



**Hélder Ismael Novais  
Gonçalves**

**Revestimento de parede como componente passivo  
para controlo de humidade ambiente**





**Hélder Ismael Novais  
Gonçalves**

**Revestimento de parede como componente passivo  
para controlo interno de humidade ambiente**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestrado em Engenharia de Materiais, realizada sob a orientação científica do Doutor João António Labrincha Batista, Professor Associado do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro.



## **o júri**

Presidente

**Prof. Doutora Ana Maria Bastos da Costa Segadães**

Professora associada do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro

Vogais

**Prof. Doutor João António Labrincha Batista**

Professor Associado do Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro da Universidade de Aveiro

**Especialista Engº Luis Miguel Cardoso da Silva**

Director Técnico da Saint-Gobain Weber Cimenfix (Portugal)



## **Agradecimentos**

Ao Prof. Doutor João Labrincha, por toda a disponibilidade e partilha de conhecimentos, bem como pelo estímulo, apoio e compreensão sempre presentes durante a realização deste trabalho.

À empresa Saint-Gobain Weber Cimenfix – Argamassas Industriais, S.A., em especial ao Eng.º Luís Silva e ao Eng.º Nuno Vieira, pelo apoio técnico, disponibilização do material e equipamentos, assim como pela disponibilidade e partilha de conhecimentos.

A todos os colegas e amigos pelo constante apoio, motivação e amizade demonstradas durante todo o meu percurso.

Aos meus pais e irmão, pela alegria, carinho e estabilidade que sempre me transmitiram e pelo incentivo constante.

À Sandra, pelo carinho e incentivo presentes em todos os momentos.

A todas as pessoas que, directa ou indirectamente, ajudaram na realização desta trabalho.

A todos muito obrigado!





## palavras-chave

Argamassa, vermiculite expandida, perlite expandida, agente expansivo, introdutor de ar, porosidade, controlo de humidade, MBV.

## resumo

No presente trabalho estudou-se a capacidade de controlo de humidade ambiente pelo uso de argamassas porosas. Partiu-se de uma argamassa de cal aérea e cimento (a que se deu o nome de padrão) e adicionaram-se vários adjuvantes, em quantidades distintas. Os adjuvantes utilizados (vermiculite expandida, perlite expandida, agente expansivo e introdutor de ar) foram introduzidos na argamassa com a finalidade de alterar a porosidade (volume e dimensão de poros). Estas modificações alteraram outras propriedades, devidamente avaliadas.

O trabalho pode ser dividido em duas partes, a primeira em que se faz uma avaliação das propriedades da argamassa e a segunda em que se avalia a capacidade de controlo da humidade do ar num ambiente fechado. A avaliação das propriedades das argamassas foi realizada no produto em pasta e no material endurecido. No produto em pasta fez-se a determinação da percentagem de água, a percentagem de ar incluído e a densidade do amassado. No produto endurecido avaliou-se a variação de massa e dimensional (após 7 e 28 dias de cura), a densidade (inicial e ao fim de 7 e 28 dias de cura), o módulo de elasticidade (7 e 28 dias), a resistência à flexão e à compressão, o coeficiente de absorção de água por capilaridade, o coeficiente de resistência à difusão da vapor e a porosidade por porosimetria de mercúrio (estes só ao fim de 28 dias de cura). A capacidade de controlar a humidade foi aferida de acordo com o procedimento NordTest, no qual se impõe uma variação cíclica da humidade relativa entre 33% e 75% durante 16 e 8 horas, respectivamente, e se registam as variações de massa das amostras. Calcula-se o valor de MBV (moisture buffer value).

O maior valor de MBV foi obtido com a amostra B2 (com 5% de vermiculite). No entanto as amostras D2 e E1 também mostram capacidade acrescida de ajuste da humidade, em relação à amostra padrão. A introdução de vermiculite aumenta consideravelmente a porosidade fina e diminui o coeficiente de resistência à difusão de vapor. Porém, esta melhoria é acompanhada pela degradação das propriedades mecânicas, o que exige estudos de compromisso em função da aplicação.



## **Keywords**

Mortar, expanded vermiculite, expanded perlite, expansive agent, air introducer.

## **Abstract**

In the present work, the moisture buffer capacity of porous mortars was studied. The starting material was a lime and cement mortar (standard) to which various adjuvants were added, in distinct amounts. The adjuvants (expanded vermiculite, expanded perlite, expansive agent and air introducer) were introduced with the aim of varying the porosity. These modifications changed other properties, which were properly evaluated.

This work can be divided in two parts, the evaluation of the mortar properties was made in the first and the moisture buffer capacity in a closed environment was evaluated in the second. The mortar properties were determined for fresh and hardened mortar. The water %, the air content and the density were calculated for the fresh mortar. For the hardened mortars several calculation were made such as the weight and size variations (after 7 and 28 curing days), the dry bulk density (initial and after 7 and 28 curing days), the elasticity modulus (7 and 28 days), the flexure and compressive strength, the water absorption coefficient due to capillary action, the water vapor diffusion resistance coefficient, and also the porosity by mercury porosimetry (after 28 curing days). The moisture buffer capacity was checked in agreement with the NordTest procedure, in which a cyclic relative moisture variation is performed between 33% and 75% during 16 and 8 hours, respectively, and for which the weight variation of the samples is registered. The MBV (moisture buffer value) is then calculated.

The highest MBV was obtained for the B2 sample (5% vermiculite). The D2 and D1 samples, however, also revealed improved moisture buffer capacity, in relation to the standard. The introduction of vermiculite considerably raises the low size porosity and reduces the moisture diffusion resistance coefficient. Nevertheless, this improvement is followed by the degradation of the mechanical properties, which demands for compromise studies based on material application.

# Índice Geral

<b>Índice de tabelas</b>	iv
<b>Índice de figuras</b>	v
<b>1. Enquadramento e objectivos</b>	1
<b>2. Introdução teórica</b>	2
2.1. Argamassas	3
2.1.1. Breve resumo da evolução histórica	3
2.1.2. Classificação segundo a aplicação	4
2.1.2.1.Argamassas de alvenaria	4
2.1.2.2.Argamassas de revestimento	4
2.1.2.3.Argamassas de suporte para pavimentos	5
2.2. Materiais constituintes das argamassas	5
2.2.1. Agregados	5
2.2.2. Ligantes	6
2.2.2.1.Ligantes de gesso	6
2.2.2.2.Ligantes de cal	7
2.2.2.3.Ligantes de cimento	8
2.2.3. Adjuvantes e aditivos	8
2.2.3.1.Promotores de aderência	9
2.2.3.2.Hidrófugos de massa	9
2.2.3.3.Introdutores de ar	9
2.2.3.4.Plastificantes	10
2.2.3.5.Agentes expansivos	10
2.2.3.6.Retentores de água	11
2.2.3.7.Pozolanas naturais e artificiais	11
2.2.3.8.Cargas leves	11
2.2.3.9.Fungicidas	12
2.2.3.10.Pigmentos	12
2.2.3.11.Fibras	12

2.3. Transferência de humidade em materiais porosos	13
2.3.1. Higróscopidade de materiais porosos	13
2.3.2. Adsorção e desadsorção de humidade	14
2.3.3. Etapas do processo de fixação e perda de água	15
2.4. Avaliação da capacidade de controlo de humidade em materiais de construção	17
2.4.1. Descrição do fenómeno de controlo de humidade: diferentes níveis	17
2.4.2. Efusividade da humidade: $b_m$	19
2.4.3. MBV ideal	19
2.4.4. MBV prático	21
2.4.5. Classificação dos materiais segundo o $MBV_{prático}$	22
<b>3. Procedimento experimental</b>	<b>25</b>
3.1. Constituintes e produção das amostras	25
3.2. Ensaio de caracterização	27
3.2.1. Caracterização da argamassa fresca	28
3.2.2. Caracterização da argamassa endurecida	29
3.2.3. Controlo de humidade ( $MBV_{prático}$ )	35
<b>4. Apresentação e discussão dos resultados</b>	<b>37</b>
4.1. Produto em pasta	37
4.2. Produto endurecido	39
4.2.1. Variação de massa	39
4.2.2. Variação dimensional	40
4.2.3. Densidade	41
4.2.4. Módulo de elasticidade	43
4.2.5. Resistência à flexão	44
4.2.6. Resistência à compressão	45
4.2.7. Porosidade	46
4.2.8. Coeficiente de absorção de água por capilaridade	49
4.2.9. Coeficiente de resistência à difusão de vapor	50

4.3. Controlo de humidade	51
<b>5. Conclusão e propostas de trabalho futuro</b>	<b>59</b>
<b>6. Referências bibliográficas</b>	<b>61</b>

## Índice de tabelas

<b>Tabela 1:</b> Intervalos para as diferentes classes de $MBV_{prático}$	22
<b>Tabela 2:</b> Resultados do MBV de vários materiais obtidos no projecto NordTest	23
<b>Tabela 3:</b> Composição da argamassa industrial, utilizada como amostra padrão	24
<b>Tabela 4:</b> Composição das argamassas em estudo	25
<b>Tabela 5:</b> Ensaios realizados ao produto em pasta e endurecido	26

## Índice de figuras

<b>Figura 1:</b> Curva típica de adsorção e desadsorção.	15
<b>Figura 2:</b> Etapas do processo de fixação de água por adsorção; a) adsorção monomolecular, b) adsorção plurimolecular, c) condensação capilar.	16
<b>Figura 3:</b> Esquema descritivo dos três níveis em que se pode dividir o fenómeno de buffer de humidade em ambiente interior.	18
<b>Figura 4:</b> ciclo experimental de 8h em ambiente com HR = 75% seguido de 16h em ambiente com HR = 33%, durante 5 dias. A variação de humidade relativa ( $\Delta HR$ ) é de 42%.	21
<b>Figura 5:</b> Equipamento de medição de ar incluído.	29
<b>Figura 6:</b> Provets produzidos para cada amostra.	29
<b>Figura 7:</b> Micrómetro de medição da retracção.	30
<b>Figura 8:</b> Análise da frequência de ressonância de uma amostra.	31
<b>Figura 9:</b> Máquina de ensaios de resistência à flexão e à compressão.	32
<b>Figura 10:</b> Meios prismas colocados num recipiente com água, durante o ensaio de capilaridade.	33
<b>Figura 11:</b> Pesagem ao conjunto tina + bolacha com revestimento de parafina.	34
<b>Figura 12:</b> a) Câmara climática com balança de precisão; b) Computador responsável pelo registo da variação de massa da amostra;	36
<b>Figura 13:</b> Esquema do ensaio de humidade ( $MBV_{prático}$ ).	36
<b>Figura 14:</b> Percentagem de água e de ar incluído dos amassados	37
<b>Figura 15:</b> Densidade dos amassados.	38
<b>Figura 16:</b> Variação de massa após 7 e 28 dias de cura.	39
<b>Figura 17:</b> Variação dimensional após 7 e 28 dias de cura.	40
<b>Figura 18:</b> Densidade das amostras no momento da desmoldagem e após 7 e 28 dias de cura.	41
<b>Figura 19:</b> Módulo de elasticidade após 7 e 28 dias de cura.	43
<b>Figura 20:</b> Resistência à flexão após 28 dias de cura.	44
<b>Figura 21:</b> Resistência à compressão após 28 dias de cura.	45
<b>Figura 22:</b> Porosidade das amostras em estudo.	46
<b>Figura 23:</b> Distribuição do volume de poros da amostra padrão.	47



<b>Figura 24:</b> Distribuição do volume de poros na amostra com 2% e 5% de vermiculite (B1 e B2, respectivamente).	48
<b>Figura 25:</b> Distribuição do volume de poros na amostra com 2% e 5% de perlite (C1 e C2, respectivamente).	48
<b>Figura 26:</b> Distribuição do volume de poros na amostra com 0,05% e 0,10% de agente expansivo (D1 e D2, respectivamente).	48
<b>Figura 27:</b> Distribuição do volume de poros na amostra com 0,025% e 0,05% de agente introdutor de ar (E1 e E2, respectivamente).	49
<b>Figura 28:</b> Coeficiente de absorção de água por capilaridade após 28 dias de cura.	50
<b>Figura 29:</b> Coeficiente de resistência à difusão de vapor após 28 dias de cura.	50
<b>Figura 30:</b> Variação da massa da amostra A durante o ensaio de controlo de humidade.	52
<b>Figura 31:</b> Variação da massa da amostra B1 (a) e B2 (b) durante o ensaio de controlo de humidade.	52
<b>Figura 32:</b> Variação da massa da amostra C1 (a) e C2 (b) durante o ensaio de controlo de humidade.	52
<b>Figura 33:</b> Variação da massa da amostra D1 (a) e D2 (b) durante o ensaio de controlo de humidade.	53
<b>Figura 34:</b> Variação da massa da amostra E1 (a) e E2 (b) durante o ensaio de controlo de humidade.	53
<b>Figura 35:</b> MBV das amostras em estudo aos 28 dias de cura.	54
<b>Figura 36:</b> MBV da absorção e libertação de humidade nas amostras com 28 dias de cura.	56



## 1. Enquadramento e objectivo

Os teores de humidade são um parâmetro essencial na definição da qualidade do ar no interior das habitações, podendo determinar a saúde e o bem-estar das pessoas, bem como a produtividade das mesmas. Além disso, os níveis de humidade do ar podem interferir na preservação dos equipamentos e recheios existentes no interior dos compartimentos dos edifícios (em particular nos museus, em salas com equipamentos electrónicos, nas bibliotecas).

Os valores de humidade do ar no interior dos edifícios apresentam variações sazonais ou diárias de grande relevância. Actualmente, sabe-se que a presença de materiais porosos com capacidade de absorver e libertar humidade do ar pode controlar e estabilizar os níveis de humidade registados em ambientes interiores. É neste contexto que se desenvolve o presente trabalho, em que se pretende avaliar a capacidade de absorção/libertação de humidade de várias argamassas porosas de revestimento e a sua capacidade de controlar o teor de humidade num espaço fechado.

Estudaram-se argamassas porosas à base de cal aérea e cimento. Como ponto de partida usou-se uma formulação com cal aérea (comercializada pela empresa “Saint-Gobain Weber Cimenfix – Argamassas Industriais, S.A.”) com elevada porosidade e sobre a mesma induziram-se alterações no intuito de afectar a estrutura porosa. As argamassas foram caracterizadas em termos físicos e mecânicos e depois avaliou-se a capacidade de absorção/libertação de humidades em ambiente fechado.



## **2. Introdução teórica**

### **2.1. Argamassas**

Uma argamassa é uma mistura artificial constituída por agregados naturais ou artificiais de dimensões relativamente pequenas, ligadas por um cimento que, juntamente com a água, mantém a forma do conjunto e lhe confere solidez. Actualmente as formulações são mais complexas e usam-se adjuvantes ou aditivos para ajustar algumas características que facilitem a aplicação ou melhorem as propriedades.

#### **2.1.1. Breve resumo da evolução histórica**

O uso de argamassas na construção de edifícios iniciou-se há milhares de anos, tendo sido objecto de alguma evolução, de forma a encontrar soluções cada vez mais adequadas às necessidades das pessoas. No antigo Egipto e no médio Oriente utilizava-se gesso impuro como elemento ligante na construção de monumentos, enquanto a cal calcinada foi usada durante séculos por gregos e romanos [1,2,3,4].

Os romanos utilizavam pozolanas (cinzas vulcânicas com capacidade aglomerante) que reagindo com a cal formavam hidratos, conferindo consistência à mistura e aumentando a durabilidade. O uso de aditivos e adjuvantes (tais como cinzas, resinas, fibras naturais, gorduras e sabão) generalizou-se na Idade Média para melhorar as propriedades das argamassas [1,2,3,4].

Actualmente os agregados mais comuns são areias siliciosas, os ligantes são elementos de natureza hidráulica tais como o gesso, a cal ou o cimento, enquanto os aditivos podem ter acção hidrófuga, introdutora de ar, plastificante, retentora de água, de redução de peso (cargas leves) ou de aumento de durabilidade (pozolanas naturais ou artificiais).

## **2.1.2. Classificação segundo a aplicação**

As argamassas são tradicionalmente, utilizadas no revestimento de paredes e muros e na colagem de pavimentos e revestimentos. Desta forma, podem distinguir-se três grupos de argamassas, classificadas segundo a aplicação a que se destinam: argamassas de alvenaria, argamassas de revestimento e argamassas de suporte para pavimentos.

### **2.1.2.1. Argamassas de alvenaria**

As argamassas de alvenaria são utilizadas para elevar muros e paredes, quer de tijolos, quer de blocos. A principal função destas argamassas é garantir uma união estável entre aqueles elementos, enquanto os principais requisitos são boa resistência mecânica, boa aderência e capacidade de acomodar movimentos devidos a tensões mecânicas e variações térmicas e de humidade. Estas argamassas são elaboradas com cal e, principalmente, cimento [5].

### **2.1.2.2. Argamassas de revestimento**

As argamassas de revestimento são utilizadas para revestir paredes e muros, podendo ser hidrófugas ou não, pintadas, ou ser alvo de uma variedade de acabamentos, em particular coloridas com recurso à adição de pigmentos.

As argamassas de revestimento podem dividir-se em formulações de estuque e de reboco. A grande maioria das argamassas de reboco é baseada em cimento, cal ou misturas de cimento e cal ou gesso e cal. Quando o ligante é essencialmente gesso as argamassas são consideradas de estuque, exercendo funções de protecção e decorativa.

As argamassas de reboco constituem uma superfície protectora, plana e regularizadora, susceptível de receber um tratamento decorativo final. Podem variar consideravelmente em resistência e porosidade, mas na prática são preferidas aquelas que têm a capacidade de absorver e libertar vapor de água. Além disso, uma argamassa não deve ter uma elevada capacidade de retenção de água, pois a presença permanente de água origina a sua deterioração. Ao invés, a baixa capacidade de retenção de água numa argamassa pode ser prejudicial, pois permite a absorção de água pelos elementos que

constituem a alvenaria. A elevada taxa de evaporação de água pode também ser prejudicial, pois poderá levar à degradação da argamassa.

A dificuldade em encontrar um compromisso satisfatório para as mais variadas propriedades de uma argamassa leva a que, por vezes, se produzam rebocos constituídos por várias camadas: as primeiras camadas com funções de aderência ao suporte, regularização e protecção, e as seguintes com funções de acabamento e decoração. Quanto às argamassas de reboco em monocamada, estas desempenham as funções de um reboco tradicional em várias camadas. São aplicadas por projecção, de forma fácil e rápida. Estas argamassas são preparadas em fábrica, bastando adicionar a porção de água necessária para formar uma pasta com a consistência pretendida [6].

### **2.1.2.3. Argamassas de suporte para pavimentos**

Este tipo de argamassas é geralmente utilizado para nivelar e alisar uma superfície, preparando-a para a aplicação de pavimentos. O seu requisito essencial é a elevada resistência à compressão, pelo que são preferencialmente constituídas por cimento [5].

## **2.2. Materiais constituintes das argamassas**

Tal como foi anteriormente referido, as argamassas são constituídas por agregados (comummente também designados por inertes ou cargas), elementos ligantes e, por vezes, aditivos ou adjuvantes.

### **2.2.1. Agregados**

Os agregados utilizados na formulação de argamassas são preferencialmente areias siliciosas, dada a sua abundância e adequada estabilidade química. No entanto são também utilizadas areias calcárias e argilosas, bem como cerâmicos fragmentados, brita e cascalho.

Os agregados são constituintes praticamente inertes na formulação das argamassas. No entanto, apesar de não serem coesivos, têm um papel fundamental na compacidade e na ocupação dos espaços, tal como na minimização da retracção das argamassas. Estas características são resultado da elevada inércia química, do baixo coeficiente de expansão térmica, da resistência mecânica e, fundamentalmente, da forma e tamanho das partículas. [7,8]

Os agregados naturais são geralmente constituídos por partículas arredondadas e lisas, enquanto os agregados gerados pelo esmagamento de rochas ou cerâmicos são angulosos, produzindo argamassas com melhor empacotamento entre as partículas. De forma semelhante, a elevada distribuição de tamanhos de partícula permite a obtenção de um empacotamento mais eficiente. Estas medidas contribuem para o incremento da resistência e durabilidade, diminuição da porosidade, bem como a possibilidade de obter soluções mais económicas dado que permitem diminuir a dosagem de ligante [5,7].

### **2.2.2. Ligantes**

Os ligantes são componentes que têm a capacidade de aglutinar partículas e que funcionam como elementos activos no estabelecimento da ligação entre os vários componentes das argamassas. Os ligantes mais utilizados apresentam-se na forma de pó fino, com capacidade de originar uma pasta quando misturados com água e desenvolver endurecimento. A pasta ganha presa e endurece através de reacções de hidratação e/ou carbonatação [7,9].

As argamassas são constituídas por ligantes de gesso (usadas em revestimento e decoração), cal (revestimento) ou cimento (revestimento e assentamento). Os ligantes de cal dividem-se em dois subgrupos: cal aérea e cal hidráulica.

#### **2.2.2.1. Ligantes de gesso**

O gesso é, desde há muito tempo, um ligante utilizado na produção de argamassas devido à facilidade de produção e à capacidade de endurecer rapidamente, que está



relacionada com a acção de presa da água de cristalização. O gesso é sulfato de cálcio,  $\text{CaSO}_4$ , que existe na natureza na forma hidratada, com cada molécula de sulfato de cálcio a suportar duas moléculas de água como parte da sua estrutura cristalina ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). A temperaturas entre 120 °C e 150 °C a água é parcialmente evaporada, ficando apenas meia molécula de  $\text{H}_2\text{O}$  ligada a duas moléculas de  $\text{CaSO}_4$ . Este hemi-hidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ) existe como um pó branco que com a adição de água recristaliza e forma o hidrato original, de superior rigidez. [8, 10].

As argamassas de gesso apresentam, em geral, baixos custos de produção. A baixa resistência mecânica e solubilidade em águas pluviais são as características menos interessantes. Por isso, as argamassas de gesso são mais usadas em climas secos e no interior de edifícios.

### 2.2.2.2. Ligantes de cal

A cal, que durante muitos anos foi o elemento ligante mais utilizado, divide-se em dois tipos: cal aérea e hidráulica. Esta distinção resulta da forma de endurecimento, por carbonatação ou hidratação, respectivamente.

A **cal aérea** é constituída fundamentalmente por óxidos ou hidróxidos de cálcio. Endurece lentamente ao ar por reacção de carbonatação com o dióxido de carbono existente na atmosfera [7]. A cal aérea pode ser classificada em dois tipos: cal viva e cal hidratada. A cal viva, constituída principalmente por óxido de cálcio e por óxido de magnésio, é o produto resultante da calcinação de rochas calcárias ou de dolomites a cerca de 900 °C. Quanto à cal hidratada (comummente designada por cal apagada), resulta da hidratação da cal viva, dando origem ao hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Esta pode ser produzida sob a forma de pó seco, de pasta ou de calda.

A **cal hidráulica** tem a capacidade de fazer presa, endurecer e manter as suas propriedades ao longo do tempo quer em contacto com o ar quer em presença de água. É obtida por calcinação de calcários com teores de argila superiores a 10%, que assegura a existência de teores substanciais de sílica e alumina. A presença destes elementos origina a formação de estruturas siliciosas e alumino-siliciosas, parcialmente amorfas, durante a

calcinação. Estes componentes podem reagir com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente e formar silicatos e aluminatos de cálcio hidratados [8]. A hidraulicidade da cal pode também ser melhorada se se adicionarem pozolanas ou outros materiais cuja constituição contenha sílica e/ou alumino-silicatos amorfos, que reagem de forma descrita mas mais intensamente.

A cal hidráulica proporciona boa trabalhabilidade, aumento da resistência mecânica quando comparada com a cal aérea, boa aderência às superfícies, um bom acabamento e maior rentabilidade de mão-de-obra [1, 6].

### 2.2.2.3. Ligantes de cimento

Actualmente o cimento é o ligante mais utilizado, tendo como características mais apelativas a elevada resistência mecânica, durabilidade e baixo custo. É classificado como um elemento hidráulico, isto é, ganha presa e endurece tanto ao ar como debaixo de água. O cimento é produzido pela cozedura de uma mistura de matérias-primas calcárias e argilosas contendo óxido de cálcio, sílica, alumina, óxido de ferro e óxido de magnésio, dando origem ao clínquer. O processo de formação do clínquer inicia-se quando os componentes fundamentais das argilas reagem com o óxido de cálcio derivado do calcário, dando origem a silicatos e aluminatos de cálcio, especialmente silicato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_3\text{S}$ ), silicato dicálcico ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ou  $\text{C}_2\text{S}$ ), juntamente com menores quantidades de aluminato tricálcico ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_3\text{A}$ ) e aluminoferrite tetracálcica ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  ou  $\text{C}_4\text{AF}$ ). Quando na presença de água, os silicatos e alumino-silicatos de cálcio formam produtos de hidratação, constituídos por microcristais que se entrelaçam entre si e que com o tempo originam um corpo duro e resistente [8].

### 2.2.3. Adjuvantes e aditivos

Os adjuvantes e aditivos são utilizados com o objectivo de alterar algumas características da argamassa, por acção física, química ou mecânica, sem no entanto modificarem o seu aspecto visual (excepção feita aos pigmentos).

Designa-se por adjuvante a substância utilizada em percentagem inferior a 5% da massa do ligante, adicionada durante a amassadura, com a finalidade de alterar algumas características da argamassa, no fresco e/ou no estado endurecido. Quando a percentagem da substância adicionada for superior a 5% da massa do ligante passa-se a designar por aditivo [1, 6, 11]. De seguida serão enumerados alguns dos adjuvantes/aditivos mais comuns [1, 6, 12-14]:

### **2.2.3.1. Promotores de aderência**

Os agentes promotores de aderência são, geralmente, constituídos por resinas e destinam-se a melhorar a aderência sem aumentar o teor de ligante na mistura. Tendem a aumentar a resistência à tracção e à flexão, ao melhorarem a ligação entre os grãos. Causam redução do módulo de elasticidade.

### **2.2.3.2. Hidrófugos de massa**

Os hidrófugos de massa são constituídos por partículas finas e insolúveis, em regra sais metálicos de ácidos orgânicos em emulsão. Destinam-se a obturar capilares e a impedir, pelo menos parcialmente, a penetração de água ou a circulação de água na argamassa. Tal é conseguido por redução da tensão capilar no interior da mistura, levando a uma melhoria das capacidades de impermeabilização.

### **2.2.3.3. Introdutores de ar**

Os introdutores de ar geram, durante o processo de amassadura das argamassas, pequenas bolhas de ar, de forma esférica e com diâmetros entre 10 $\mu$ m e 1mm. Estas bolhas de ar funcionam como um corte de capilaridade, melhorando a capacidade de impermeabilização, resistência aos sais e resistência ao gelo-degelo (as bolhas de ar, relativamente compressíveis, permitem compensar o aumento de volume por congelação da água). A introdução de bolhas de ar pode modificar a reologia da argamassa fresca, tornando-a mais homogénea e trabalhável. Os efeitos dos introdutores de ar no produto

endurecido traduzem-se na redução da massa volúmica e do módulo de elasticidade, em simultâneo com a diminuição da resistência à tracção e à compressão. Podem também afectar negativamente a aderência, exigindo-se uma amassadura bem controlada por forma a minimizar os efeitos indesejáveis, uma vez que estes estão fortemente dependentes do tempo, da velocidade e do modo de amassadura.

O princípio de actuação destes adjuvantes baseia-se na formação de uma barreira insolúvel de iões em torno das bolhas de ar formadas durante a amassadura, que impede a dissolução de bolhas pequenas e o crescimento de bolhas grandes. Assim, a argamassa apresentará bolhas com diâmetros pequenos, espaçamentos baixos e formas regulares e estáveis.

### **2.2.3.4. Plastificantes**

Os plastificantes aumentam a trabalhabilidade da argamassa e diminuem a segregação, permitindo reduzir o teor de água e, eventualmente o teor de ligante, o que resulta numa menor retracção durante a cura. O princípio de funcionamento dos plastificantes baseia-se na dispersão das partículas do ligante na fase aquosa da argamassa, aumentando a sua superfície específica e facilitando a sua hidratação. Como efeito secundário podem retardar a presa e reduzir a resistência mecânica nas idades iniciais.

### **2.2.3.5. Agentes expansivos**

Os agentes expansivos são produtos que permitem compensar a retracção existente durante a presa, induzindo uma ligeira expansão na argamassa. Estes possibilitam o melhoramento da homogeneidade e da estabilidade da pasta (diminuição da segregação de água e melhoramento da retenção da mesma). Os agentes expansivos são elementos que, quando em contacto com os constituintes das argamassas, produzem pequenas bolhas de gás responsáveis por um ligeiro aumento do volume do produto endurecido.

#### **2.2.3.6. Retentores de água**

Os retentores de água têm a função de regular a perda de água de amassadura durante o processo de secagem (principalmente em tempo quente). Deste modo, é assegurado que a argamassa sofra uma hidratação mais completa, tornando-se menos sensível às condições climáticas e evitando a formação de fissuras por retracção. São geralmente derivados celulósicos e podem agir simultaneamente como agentes espessantes, modificando a reologia da argamassa fresca.

#### **2.2.3.7. Pozolanas naturais e artificiais**

As pozolanas são materiais siliciosos ou aluminosos que, muito finamente divididos e na presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio livre, formando compostos com propriedades cimentíceas (silicatos e aluminatos de cálcio hidratados). As pozolanas, de estrutura amorfa e muito reactivas, podem ser naturais ou artificiais. As pozolanas naturais são materiais de origem vulcânica, enquanto as artificiais resultam geralmente de subprodutos industriais gerados em processos técnicos (exemplo, centrais termoeléctricas) tais como cinzas volantes, escórias de alto-forno ou sílica de fumo.

#### **2.2.3.8. Cargas leves**

As cargas leves são actualmente muito utilizadas na formulação de argamassas, em geral na forma granular. O poliestireno expandido, a vermiculite expandida, a perlite expandida, a pedra-pomes e os granulados de vidro expandido são os mais comuns. A vermiculite é obtida a partir de uma rocha micácea contendo silicatos de alumínio, ferro e magnésio, enquanto a perlite é obtida a partir de uma rocha vulcânica siliciosa.

As cargas leves diminuem a massa volúmica aparente da argamassa, bem como o seu módulo de elasticidade, a resistência à flexão e a resistência à compressão. Possibilitam a produção de argamassas deformáveis e de baixa densidade, ideais para situações onde se deseje baixo peso (baixa densidade), aliado a resistências mecânicas capazes de satisfazer os requisitos exigidos. O uso destes aditivos provoca o aumento

considerável do teor de água de amassadura e da retracção, contribuindo também para a diminuição da resistência ao impacto. Além disso têm o inconveniente de diminuir a resistência aos ciclos gelo-degelo devido ao aumento de absorção de água.

### **2.2.3.9. Fungicidas**

Os fungicidas impedem a fixação e proliferação de microrganismos (bolores, fungos, líquenes) nas argamassas, sendo elementos constituídos por compostos orgânicos com base em heterociclos azotados. Estas substâncias são normalmente adicionadas nas argamassas. No entanto quando se pretende aplicar uma tinta sobre a argamassa é mais comum introduzir estes adjuvantes na tinta.

### **2.2.3.10. Pigmentos**

Geralmente, os pigmentos são estruturas complexas de óxidos metálicos (de ferro, de crómio, de cobalto ou de manganês) que se adicionam à argamassa em pequenas quantidades para lhe conferir cor. Em alternativa podem usar-se corantes, constituídos directamente por aqueles óxidos.

### **2.2.3.11. Fibras**

A introdução de fibras nas argamassas tem como função principal aumentar a resistência à tracção e a ductilidade. Desta forma, melhoram a resistência ao fendilhamento e ao choque, bem como a coesão e a resistência à penetração de água. Para tal, é necessária uma distribuição uniforme das fibras, capazes de inibirem a transformação de microfissuras em macrofissuras.

## **2.3. Transferência de humidade em materiais porosos**

Os materiais de construção porosos, se expostos em ambiente com variações de humidade, absorvem vapor de água quando o valor da humidade relativa é elevado e libertam-na quando a humidade relativa diminui. O interesse por esta interacção entre a superfície dos materiais e a humidade do ar ambiente tem aumentado nos últimos anos.

A humidade é um parâmetro essencial na definição da qualidade do ar no interior das habitações, bem como elemento responsável pelo aparecimento de manchas e a proliferação de fungos ou outros microorganismos. Desta forma, os níveis de humidade podem influenciar a saúde das pessoas e, consequentemente, o bem-estar e a produtividade das mesmas, assim como a conservação de equipamentos e bens sensíveis a esta variável [15-18].

Os valores de humidade do ar no interior dos edifícios apresentam variações sazonais ou diárias de grande relevância. É neste contexto que a exploração da capacidade de absorção e libertação de humidade por parte de materiais porosos aparece como uma característica capaz de contribuir positivamente para o controlo e tendencial estabilização da humidade em espaços fechados. Para tal, na construção e revestimento de espaços interiores das habitações, devem-se utilizar materiais porosos com capacidade higroscópica [16-19].

### **2.3.1. Higroscopicidade de materiais porosos**

Em geral, as argamassas utilizadas na construção civil são estruturas com porosidade interligada, em que os canais porosos formam uma rede de circulação de fluídos. Esta particularidade permite que, quando em contacto com o ar, as argamassas adsorvam vapor de água, tendendo a retê-la nos seus poros até ser atingido o estado de equilíbrio. Desta forma, podem contribuir para a regulação das condições de conforto e higiene nos recintos fechados.

A higroscopicidade é uma propriedade que caracteriza a capacidade de adsorver água sob a forma de vapor. Neste fenómeno, as moléculas de água adsorvidas ficam

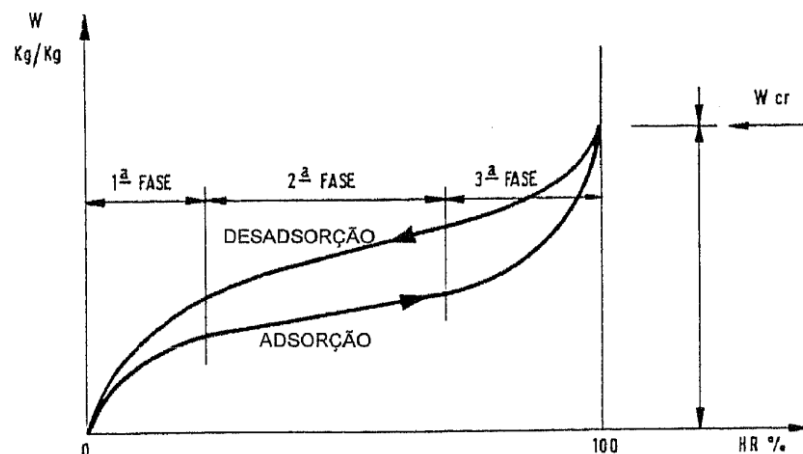
ligadas à superfície dos capilares por forças intermoleculares de Van der Waals. A higroscopicidade é muito variável de material para material, já que a quantidade de vapor de água adsorvida é influenciada pelas propriedades da estrutura (tamanho e volume de poros, distribuição porosimétrica, superfície específica) e pelo teor de sais eventualmente presentes. Pode-se dizer que um material higroscópico atinge a sua humidade de equilíbrio (ou humidade higroscópica) depois de estar exposto a um ambiente em condições estáveis de temperatura e humidade relativa durante um período de tempo prolongado. Nesta situação, a pressão de vapor de água correspondente à humidade do material é igual à pressão de vapor de água do ar ambiente. Um material muito pouco poroso entra rapidamente em estado de equilíbrio com o ambiente devido à pequena quantidade de água que pode reter nos seus poros.

O carácter higroscópico dos materiais permite classificá-los em higroscópicos ou não higroscópicos. Os materiais não higroscópicos exibem uma variação ligeira ou nula no teor de água em consequência da variação da humidade relativa, ao passo que nos materiais higroscópicos o teor de água varia de forma acentuada [18, 20-22].

### **2.3.2. Adsorção e desadsorção de humidade**

O comportamento higroscópico de um material é representado graficamente através de curvas isotérmicas de adsorção (humedecimento) e desadsorção (secagem) (Figura 1). As isotérmicas representam a relação entre o teor de água de um material na situação de equilíbrio (humidade higroscópica) e a humidade relativa do ar a uma determinada temperatura.





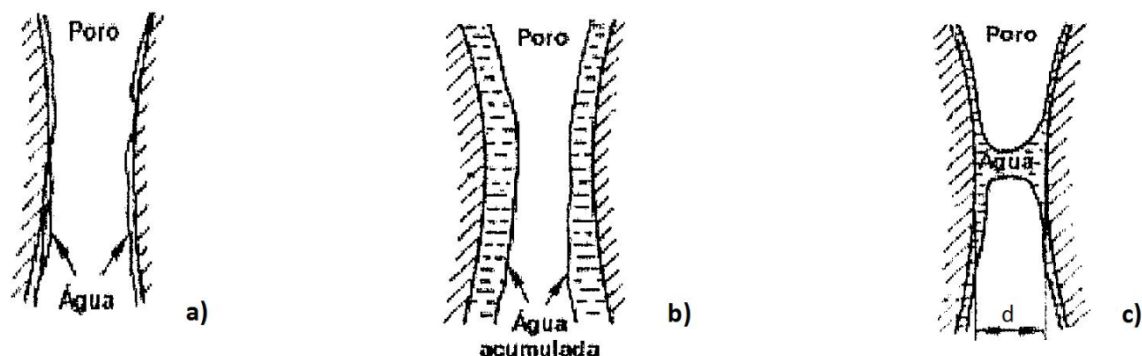
**Figura 1:** Curva típica de adsorção e desadsorção.

Geralmente, a isotérmica de adsorção é suficiente para caracterizar a capacidade de retenção de água por um material. Observa-se um rápido aumento quando o material é fortemente higroscópico. Comumente, em materiais porosos, a curva de adsorção não coincide com a curva de desadsorção de vapor de água, ocupando sempre esta última uma posição superior à primeira. Este fenómeno de histerese consiste na maior dificuldade de secagem (desadsorção) relativamente ao humedecimento (adsorção), ou seja, na fase de secagem conserva-se adsorvida uma determinada quantidade de água a uma pressão menor que a necessária no humedecimento. Assim, num determinado material, para um mesmo valor de humidade relativa do ar podem existir diferentes teores de humidades de equilíbrio. Um dos modelos mais aceites para explicar o fenómeno de histerese é o de Coahn [23]. Segundo este modelo, na fase de humedecimento do material poroso a adsorção de camadas de moléculas de água pelas paredes dos poros abertos faz diminuir a secção livre dos capilares, alterando o regime de circulação da água no estado líquido através dos poros. Na fase de secagem, os capilares estão inicialmente saturados e a evaporação dá-se por abertura do poro [20, 21].

### 2.3.3. Etapas do processo de fixação e perda de água

O processo de fixação de água em materiais porosos ocorre em 3 etapas distintas: adsorção monomolecular, adsorção plurimolecular e condensação capilar. A adsorção

monomolecular, ilustrada na Figura 2 a), consiste na fixação de uma camada de moléculas de água sobre a superfície dos poros, enquanto a adsorção plurimolecular (figura 2 b)) consiste na fixação de várias camadas de moléculas de água sobre a primeira camada adsorvida. Quanto à condensação capilar, ilustrada na figura 2 c), ocorre nos poros de menor diâmetro com a junção das camadas plurimoleculares e consequente formação de meniscos, havendo tendência para a saturação dos poros.



**Figura 2:** Etapas do processo de fixação de água por adsorção; a) adsorção monomolecular, b) adsorção plurimolecular, c) condensação capilar.

O processo de secagem de um material poroso ocorre em duas fases distintas. Na primeira, a água é transportada por capilaridade até à superfície através dos poros maiores e é evaporada para o ar. Na segunda fase do processo de secagem ocorre difusão superficial e em fase de vapor, responsável pela remoção da água adsorvida a partir dos poros mais pequenos [20, 21].

A saturação dos capilares de maiores diâmetros apenas é conseguida com o aumento da humidade relativa do ambiente. Enquanto os poros de menor diâmetro saturam completamente para teor de humidade próximo de 98%, são necessários valores superiores a 98% para que ocorra o preenchimento dos capilares com raios superiores a  $0,05\mu\text{m}$ . Pode-se, desta forma, dizer que os materiais com maior volume de pequenos poros são mais higroscópicos e têm maior capacidade de controlo da humidade do ar num recinto fechado. De assinalar ainda que quanto maior a quantidade de humidade absorvida e restituída, maior será a higroscopicidade do material [20].

## 2.4. Avaliação da capacidade de controlo de humidade em materiais de construção

Actualmente existem dois métodos principais para avaliar a capacidade dos materiais de construção no controlo da humidade do ar: a norma japonesa JIS A 1470-1 e o método NordTest. Em ambos os métodos o procedimento experimental envolve um ciclo repetitivo de subida e descida da humidade relativa do ar e medição da quantidade de água transferida através da superfície da amostra (medições em  $\text{Kg}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ ). O método NordTest, seguido durante a realização do presente trabalho, foi proposto durante um Workshop na Universidade Técnica da Dinamarca em Agosto de 2003 [15] que juntou personalidades de referência no plano internacional. Desde então, tem sido seguido por muitos investigadores ligados a esta área. Embora estes métodos permitam conhecer a quantidade de vapor de água retida e libertada por unidade de área na amostra, não quantificam a variação da humidade do ar num compartimento fechado [24]. De referir que a sigla mais comumente utilizada para classificar a capacidade de ajuste do teor de humidade por um material em espaço fechado é *MBV*, com origem na designação em inglês *Moisture Buffer Value* (que aqui se utilizará também).

Tal como já foi anteriormente referido, a humidade relativa do ar varia sazonalmente e diariamente. Nesta análise será dada mais atenção às variações ocorridas ao longo do dia. Tendo em conta que as pessoas permanecem cerca de 8h no mesmo compartimento (quarto, escritório, museus, salas de aulas, etc), adoptou-se o procedimento prático utilizado no método NordTest: as amostras são sujeitas a ciclos repetitivos com valores de humidade relativa de 75% durante 8h seguido de 16h com humidade relativa de 33% [15, 16, 18, 19, 25, 26].

### 2.4.1. Descrição do fenómeno de controlo de humidade: diferentes níveis

O controlo de humidade num compartimento fechado pode ser descrito em três níveis: a nível de compartimento, a nível de sistema e a nível de material (Figura 3)

### *Desempenho de buffer de humidade*

*Controlo* de humidade em todo o espaço de um compartimento de uma habitação, relacionado, entre outras coisas, com a área de exposição dos materiais do revestimento, o teor de humidade do ar, a taxa de ventilação e o clima no interior do compartimento.

A nível de  
compartimento

---

### *Capacidade de buffer de humidade*

Valor de *buffer* de humidade prático,

**MBV<sub>prático</sub>**

A nível de  
sistema

Efusividade da humidade,

**b<sub>m</sub>**

Valor de *buffer* de humidade ideal,

**MBV<sub>ideal</sub>**

*Análise da capacidade de controlo segundo as propriedades  
do material em condições estacionárias*

A nível de  
material

**Figura 3:** Esquema descritivo dos três níveis em que se pode dividir o fenómeno de buffer de humidade em ambiente interior.

Ao *nível do material*, a avaliação da capacidade de controlo é feita sem ter em conta o clima em que a amostra em estudo está inserida. A *nível do sistema* são tidas em conta as trocas de humidade entre a amostra em estudo e o ar circundante, dependentes da área e espessura do revestimento da parede e da velocidade de ventilação. A *nível de compartimento*, a análise é feita tendo em conta os materiais de construção e mobiliário expostos no ambiente interior, juntamente com a análise da variação de humidade, da taxa de renovação de ar e da relação entre a área da superfície do material e o volume de ar [15, 25, 26]

A capacidade de controlo de humidade por um material pode ser analisada de duas formas: (i) prática (a *nível de sistema*), usando um método prático para obter o  $MBV_{prático}$ ; (ii) teórica, recorrendo às propriedades dos materiais em condições estacionárias para calcular o  $MBV_{ideal}$  e a efusividade da humidade ( $b_m$ ).

### 2.4.2. Efusividade da humidade: $b_m$

A efusividade da humidade [ $Kg/(m^2.Pa.s^{1/2})$ ] constitui uma forma teórica de expressar a taxa de humidade absorvida por um material quando sujeito a um súbito aumento da humidade à sua superfície. A efusividade da humidade,  $b_m$ , representada na equação 1, é definida de forma semelhante à efusividade térmica.

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial u}{\partial \phi}}{p_s}} \quad (\text{Equação 1})$$

onde  $\delta_p$  [ $Kg/(m.s.Pa)$ ] é a permeabilidade ao vapor de água,  $\rho_0$  [ $Kg/m^3$ ] é a densidade em seco do material,  $u$  [ $Kg/Kg$ ] é o teor de humidade,  $\phi$  [adimensional] é a humidade relativa e  $p_s$  [ $Pa$ ] é a pressão de vapor de saturação. Com exceção da pressão de vapor de saturação, todos os parâmetros são propriedades inerentes aos materiais e independentes das condições de ensaio. Assim, a efusividade de humidade ( $b_m$ ) é dependente das propriedades dos materiais (medidas em condições estáveis) [15, 25, 26].

### 2.4.3. MBV ideal

A transferência de humidade na superfície de um material nem sempre ocorre em forma de resposta a um aumento brusco da humidade relativa do ar. Por vezes, a alteração de humidade ocorre de forma harmónica (exemplo, de acordo com a função seno), que traduz elevada transferência de humidade num certo intervalo de tempo e baixa transferência de humidade noutra intervalo de tempo distinto. Através da análise de Fourier é possível prever o fluxo de humidade numa superfície em função do tempo,  $g(t)$ .

A absorção de humidade acumulada,  $G(t)$  [Kg/m<sup>2</sup>], e respectiva libertação de humidade, ocorrem num período  $t_p$ , sendo definidas pela integração do fluxo de humidade na superfície (equação 2).

$$G(t) = \int_0^t g(t)dt = b_m \cdot \Delta p \cdot h(\alpha) \cdot \sqrt{\frac{t_p}{\pi}} \quad (\text{Equação 2})$$

onde

$$h(\alpha) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin^2(n\pi\alpha)}{n^{3/2}} \approx 2,252[\alpha(1-\alpha)]^{0,535} \quad (\text{Equação 3})$$

$\alpha$  é a fracção referente ao período de tempo durante o qual a humidade é elevada. Tendo em conta que o ciclo utilizado nos testes envolve 8h de exposição em humidade elevada e 16h em ambiente de humidade baixa,  $\alpha$  será igual a 1/3. Desta forma,  $h(\alpha)=1,007$  e a absorção de humidade acumulada pode ser expressa da seguinte forma:

$$G(t) = 0,568 \cdot b_m \cdot \Delta p \cdot \sqrt{t_p} \quad (\text{Equação 4})$$

O MBV, definido como uma característica do material baseada na sua capacidade de controlar a humidade, consiste na capacidade de absorção/retenção de humidade acumulada ( $G(t)$ ) por variação de humidade relativa no ar ( $\Delta HR$ ). O MBV é proporcional à efusividade da humidade, à raiz quadrada do tempo e à pressão de vapor de saturação. Esta definição teórica, ou *ideal*, está expressa na seguinte equação:

$$MBV_{ideal} = \frac{G(t)}{\Delta HR} = 0,00568 \cdot p_s \cdot b_m \cdot \sqrt{t_p} \quad (\text{Equação 5})$$

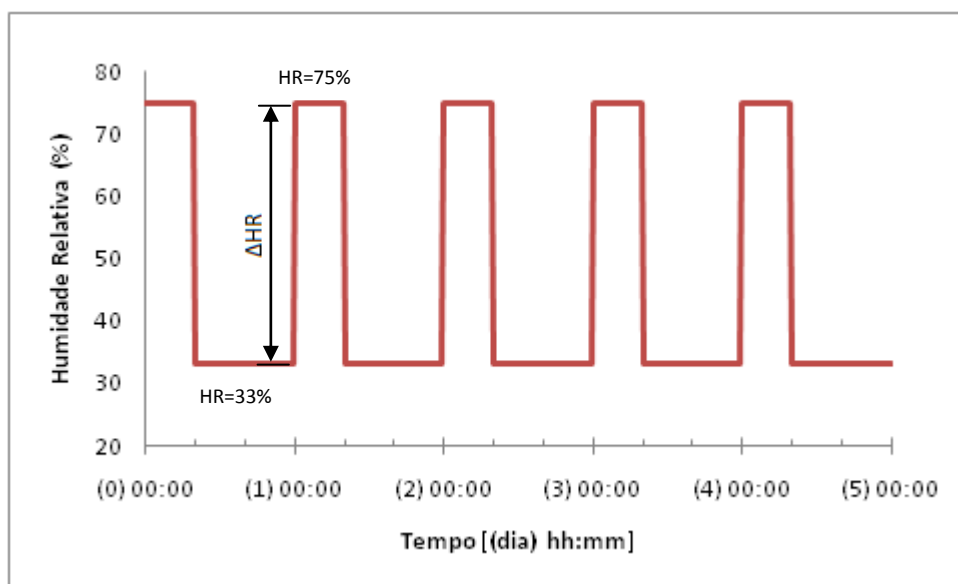
Teoricamente, a efusividade da humidade ( $b_m$ ) depende das características do material determinadas em situações estáveis (condições de equilíbrio). Contudo, as solicitações envolvem situações dinâmicas, que geram discrepâncias entre os valores de efusividade de humidade obtidos nas duas situações. Desta forma, o MBV ideal poderá ser diferente do MBV real [15, 25, 26].

#### 2.4.4. MBV prático

O MBV prático ( $MBV_{prático}$ ) é obtido através de um método no qual há um tempo de execução que corresponde a uma exposição típica – 24h do dia – com condições de humidade variáveis.

O MBV prático indica a quantidade de água que é transportada para dentro ou para fora de um material por unidade de área de superfície, durante um certo período de tempo, quando sujeito a variações de humidade relativa ( $\Delta HR$ ) no ambiente circundante. Desta forma, a unidade do  $MBV_{prático}$  é  $Kg/(m^2.\%HR)$ .

O conceito de  $MBV_{prático}$  pode ser facilmente compreendido e avaliado experimentalmente. É determinado numa montagem experimental em que a amostra é colocada num ambiente com mudanças cíclicas de humidade relativa. Como antes se disse, o material sofreu exposição de 8h num ambiente com 75% de HR, seguida de 16h num ambiente com HR de 33%. A amplitude de variação de humidade foi de 42%, sendo o ciclo repetido várias vezes, de forma a estimular o comportamento do material ao longo de vários dias (figura 4).



**Figura 4:** ciclo experimental de 8h em ambiente com HR = 75% seguido de 16h em ambiente com HR = 33%, durante 5 dias. A variação de humidade relativa ( $\Delta HR$ ) é de 42%.

Para além da quantidade de humidade transferida entre o material e o ambiente circundante, o valor de  $MBV_{prático}$  é dependente do coeficiente de transferência de massa na superfície da amostra (considera-se um bom desempenho no controlo de humidade se o coeficiente de transferência de massa tender para o infinito), do acabamento superficial (por exemplo, aplicação de tintas, isolantes) e da espessura da amostra [15, 19, 25, 26].

#### 2.4.5. Classificação dos materiais segundo o $MBV_{prático}$

A classificação da capacidade de ajuste da humidade por um material envolve diferentes categorias, com base no valor de  $MBV_{prático}$  (Tabela 1) [15].

**Tabela 1:** Intervalos para as diferentes classes de  $MBV_{prático}$ .

Classe do $MBV_{prático}$	MBV mínimo $g/(m^2 \cdot \%HR)$	MBV máximo $g/(m^2 \cdot \%HR)$
Insignificante	0	0,2
Limitado	0,2	0,5
Moderado	0,5	1,0
Bom	1,0	2,0
Excelente	2,0	...

No Round Robin realizado durante o projecto NordTest [15] os  $MBV$ 's obtidos estão apresentados na tabela 2. Estes valores servirão de comparação com os resultados auferidos durante a execução experimental do presente trabalho.



**Tabela 2:** Resultados do MBV de vários materiais obtidos no projecto NordTest.

<b>Material</b>	<b>MBV [g/(%HR.m<sup>2</sup>)]</b>
Placas de acabamento em madeira	1,16
Betão	0,38
Gesso	0,64
Madeira revestida com verniz	0,46
Betão celular	1,04
Tijolos	0,47
Placas de Vidoeiro	0,85



### 3. Procedimento experimental

O procedimento experimental dividiu-se em duas fases: primeiramente prepararam-se e analisaram-se as propriedades físicas e mecânicas das diferentes argamassas, seguindo-se a análise da capacidade de controlo de humidade das mesmas.

#### 3.1. Constituintes e produção das amostras

As amostras estudadas no presente trabalho são argamassas bastardas em que o ligante maioritário é cal aérea hidratada. Na formulação, partiu-se de uma argamassa comercializada pela empresa “Saint-Gobain Weber-Cimenfix, Argamassas Industriais, S. A.”, à qual se deu o nome de argamassa padrão (Tabela 3), e introduziram-se adjuvantes em diferentes quantidades (Tabela 4).

**Tabela 3:** Composição da argamassa industrial, utilizada como amostra padrão.

<b>Materiais constituintes</b>	<b>Unidade</b>	<b>Amostra A – Padrão</b>
Cal aérea hidratada	%	8 – 10
Cimento (Tipo 1)	%	6 – 8
Areias (amarela e do rio, na proporção 1:1)	-	Acerto
Hidrófugo de massa	%	0,10 - 0,50
Introdutor de ar	%	0,0025
Retentor de água e plastificante (éter de celulose)	%	0,05 - 0,08
Fibras	%	0 - 0,1
Cargas leves	%	1
<b>Características em pó ou pasta</b>		
Traços ponderais (ci:cal:areia)	-	1:1:5
Teor de partículas finas <80µm	%	30

Os adjuvantes utilizados na elaboração das amostras foram cargas leves (vermiculite expandida e perlite expandida), agentes expansivos (pós de derivados de alumínio) e introdutores de ar (olefina sulfonato de sódio).

**Tabela 4:** Composição das argamassas em estudo.

<b>Nomenclatura</b>	<b>Amostra</b>
A	Padrão
B1	98% padrão + 2% vermiculite
B2	95% padrão + 5% vermiculite
C1	98% padrão + 2% perlite
C2	95% padrão + 5% perlite
D1	Padrão + 0,05% agente expansivo
D2	Padrão + 0,10% agente expansivo
E1	Padrão + 0,025% introdutor de ar
E2	Padrão + 0,05% introdutor de ar

A mistura dos componentes sólidos de uma argamassa é feita com um misturador em V. O processo de amassadura com o qual se pretende obter uma boa homogeneização da mistura de pó na água, é necessariamente antecedido pela determinação da percentagem de água necessária. Seguiu os seguintes passos: introdução da água e do produto em pó no recipiente; homogeneização manual (a fim de evitar perdas de produto ou água); homogeneização na amassadora durante 15 segundos; nova homogeneização manual durante 1 minuto e homogeneização na amassadora durante 1 minuto e 15 segundos.

De seguida e sem tempo de repouso efectuaram-se os ensaios de caracterização no estado fresco e moldaram-se os provetes.

Após o enchimento dos moldes, deve-se aguardar cerca de 24 horas para se desmoldar os provetes. Estes são mantidos numa câmara climática com temperatura e humidade relativa de aproximadamente 23 °C e 50%, respectivamente.

### 3.2. Ensaio de caracterização

Com o intuito de avaliar a influência da introdução dos adjuvantes, fez-se uma análise às propriedades das argamassas. Os ensaios envolvem dois estágios: argamassa em pasta e argamassa endurecida. Por fim fez-se o ensaio de controlo de humidade, no qual se determinou o MBV de cada amostra.

**Tabela 5:** Ensaio realizado ao produto em pasta e endurecido.

Estado do produto	Ensaio	Tempo de cura	Normas
Produto em pasta	% água	-	-
	Densidade	-	-
	% de ar incluído	-	ASTM C231-49 T
Produto endurecido	Variações de massa	7d, 28d	Cahiers du CSBT (2669-4) – A3.3
	Variações dimensionais	7d, 28d	Cahiers du CSBT (2669-4) – A3.3
	Densidade	Inicial, 7d, 28d	NP EN 1015-10
	Módulo de elasticidade	7d, 28d	Cahiers du CSBT (2669-4) UNE 83-308-86
	Resistência à flexão	28d	NP EN 1015-11
	Resistência à compressão	28d	NP EN 1015-11
	Coefficiente de absorção de água por capilaridade	28d	NP EN 1015-18
	Coefficiente de resistência à difusão de vapor	28d	NP EN 1015-19 DIN 52615
	Porosimetria de mercúrio	28d	-
	Ensaio de controlo de humidade (MBV)	28d	-

### 3.2.1. Caracterização da argamassa fresca

#### Percentagem de água

A percentagem de água de um amassado é determinada através da adição de água de forma progressiva durante a amassadura da mistura, acompanhada por uma avaliação da consistência e trabalhabilidade da argamassa.

#### Densidade

Para a determinação da densidade de uma argamassa fresca recorre-se a um copo com volume conhecido, regista-se a massa do copo vazio, enche-se o copo com o amassado e regista-se novamente a massa do copo. A densidade, expressa em  $\text{g/cm}^3$ , é calculada pela seguinte equação:

$$\text{Densidade} = \frac{m_1 - m_0}{v_c} \quad (\text{Equação 6})$$

em que  $m_1$  e  $m_0$  são respectivamente à massa do copo cheio e vazio e  $v_c$  corresponde ao volume do copo.

#### Percentagem de ar incluído

A percentagem de ar incluído é analisada com recurso a um equipamento de medição apropriado (figura 5). O processo consiste, basicamente, em colocar o amassado no interior do equipamento e introduzir água até que o ar existente nesse espaço seja removido. Após isto, isola-se o sistema do exterior e bombeia-se, de forma a introduzir ar no produto. A percentagem de ar incluído é o valor indicado na escala do equipamento.



**Figura 5:** Equipamento de medição de ar incluído.

### 3.2.2. Caracterização da argamassa endurecida

Tendo em conta os ensaios a realizar nas argamassas endurecidas, foram elaborados seis provetes para cada produto: dois provetes prismáticos com dimensões  $40 \times 40 \times 160$  mm<sup>3</sup>, dois provetes prismáticos com dimensões  $25 \times 25 \times 285$  mm<sup>3</sup> e dois provetes em forma de bolacha com diâmetro de 120 mm e espessura de 20 mm (Figura 6).



**Figura 6:** Provetes produzidos para cada amostra.

### **Variações de massa**

As variações de massa são calculadas a partir das massas registadas em três momentos distintos: na desmoldagem dos provetes, aos 7 dias e aos 28 dias de cura. A variação de massa, expressa em percentagem, é calculada pela seguinte equação:

$$\text{Variação massa} = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (\text{Equação 7})$$

em que  $m_i$  e  $m_f$  correspondem, respectivamente, a massa inicial (após a desmoldagem) e massa final.

### **Variações dimensionais**

Tal como as variações de massa, as variações dimensionais foram determinadas em momentos distintos: após desmoldagem dos provetes, aos 7 dias e aos 28 dias de cura. Estas medições foram efectuadas com recurso a um micrómetro (Figura 7). A variação dimensional é calculada pela seguinte equação:

$$\text{Variação dimensional} = \frac{l_f - l_i}{16} \times 100 \quad (\text{Equação 8})$$

em que  $l_i$  e  $l_f$  correspondem, respectivamente, às dimensões iniciais e finais. A variação de massa é expressa em mm/m.



**Figura 7:** Micrómetro de medição da retracção.



## Densidade

A densidade das argamassas é calculada a partir da massa dos provetes de dimensões  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ , registada após a desmoldagem, aos 7 dias e aos 28 dias de cura. A densidade do produto endurecido é calculada pela seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{Equação 9})$$

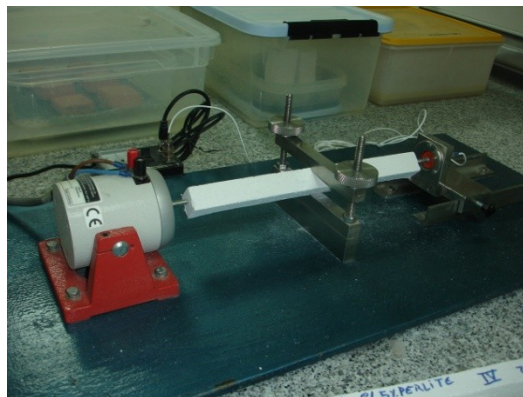
onde  $\rho$  é a densidade ( $\text{g/cm}^3$ ),  $m$  é a massa do provete e  $v$  é o volume do provete.

## Módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade (módulo de Young) de uma argamassa é necessário registar a massa e a frequência de ressonância dos provetes após 7 dias e 28 dias de cura. A frequência de ressonância é avaliada com recurso a um equipamento adequado, no qual se fixa o provete e se aplicam impulsos mecânicos que vão gerar uma frequência própria do provete em vibração livre (figura 8). O módulo de elasticidade ( $E$ ), proporcional à frequência de ressonância lida no equipamento, é calculado pela seguinte equação:

$$E = \frac{4.F.l.m}{g.v} \quad (\text{Equação 10})$$

onde  $F$  é a frequência de ressonância (em Hz),  $l$  é o comprimento do provete,  $m$  é a massa do provete,  $g$  é a aceleração gravítica e  $v$  é o volume do provete.



**Figura 8:** Análise da frequência de ressonância de uma amostra.

### Resistência à flexão

Para a determinação da resistência à flexão utilizaram-se os provetes de dimensões  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  com cura de 28 dias, sendo aproveitadas as metades resultantes deste ensaio para os ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade. O equipamento utilizado permite realizar ensaios de flexão e compressão (Figura 9).



**Figura 9:** Máquina de ensaios de resistência à flexão e à compressão.

A carga aplicada pela máquina durante o ensaio aumenta a velocidade constante, registando-se o valor da força correspondente à ruptura do provete. A resistência à flexão ( $R_f$ ) é calculada pela seguinte equação:

$$R_f = \frac{1,5.F_f.l}{b.d^2} \quad (\text{Equação 11})$$

onde  $F_f$  é a carga máxima suportada pelo provete,  $l$  é a distância entre os cilindros de apoio e  $b$  e  $d$  são as dimensões interiores do provete. Este cálculo pode ser efectuado directamente pela máquina de ensaios.

### Resistência à compressão

Na determinação da resistência à compressão utilizaram-se os meios prismas resultantes do ensaio de resistência à flexão. Sobre uma das faces laterais do meio prisma é aplicada uma carga que aumenta uniformemente, registando-se o valor da força aplicada

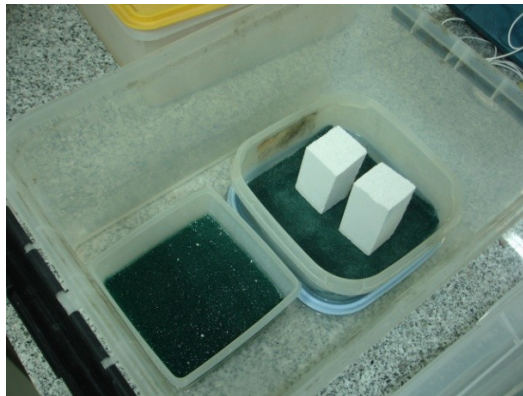
até à ruptura da amostra. A resistência à compressão ( $R_c$ ) é calculada pela seguinte equação:

$$R_c = \frac{F_c}{A} \quad (\text{Equação 12})$$

onde  $F_c$  é a carga máxima suportada pelo provete e  $A$  é a área de superfície sobre a qual se aplica a carga. Tal como no ensaio de resistência à flexão, o cálculo da resistência à compressão pode ser efectuado directamente pela máquina de ensaios.

### **Absorção de água por capilaridade**

Para a determinação da absorção de água por capilaridade utilizam-se os meios prismas resultantes dos ensaios de flexão. A execução do ensaio consiste em pesar o corpo de prova seco, colocá-lo num recipiente com uma esponja e água (até aproximadamente 5mm de água acima da esponja) e pesá-lo novamente ao fim de 10 minutos e de 90 minutos. A superfície que deve assentar na esponja com água é a que resulta da ruptura no ensaio de flexão. Este ensaio decorre no interior de uma caixa isolada que tem no seu interior uma solução de sulfato de zinco saturada, capaz de assegurar uma humidade relativa de 95%. A temperatura é mantida a aproximadamente 23 °C (Figura 10).



**Figura 10:** Meios prismas colocados num recipiente com água, durante o ensaio de capilaridade.

Experimentalmente, observa-se que, para argamassas, o valor do coeficiente de absorção de água por capilaridade ( $C$ ) pode ser obtido directamente pela diferença de

massa entre a medição aos 10 e aos 90 minutos (Equação 13). Neste caso, as unidades do coeficiente de absorção de água por capilaridade são  $\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ .

$$C = m(90') - m(10') \quad (\text{equação 13})$$

### **Coefficiente de resistência à difusão de vapor de água**

A preparação para a determinação do coeficiente de resistência à difusão de vapor consiste em verter uma solução aquosa de nitrato de potássio saturada numa tina (a solução de  $\text{KNO}_3$  é utilizada para controlar a humidade relativa do ar em valores próximos de 92%), colocar um provete em forma de bolacha sobre a tina e revestir a junta e a superfície lateral do provete com parafina, de modo a garantir um conjunto estanque. Após isto, fazem-se medições da massa do conjunto (tina + bolacha), da humidade relativa do ar e da temperatura e registam-se esses valores juntamente com o tempo a que são obtidos/effectuados (Figura 11).

O valor do coeficiente de resistência à difusão de vapor de água foi obtido através dos dados registados, recorrendo-se para isso a uma folha de cálculo previamente definida segundo a norma NP EN 1015 – 19.



**Figura 11:** Pesagem ao conjunto tina + bolacha com revestimento de parafina.

## Porosidade

A caracterização da porosidade das argamassas foi efectuada pelo método de porosimetria de intrusão de mercúrio. Este método permite obter informação sobre a estrutura porosa dos materiais, nomeadamente a distribuição de tamanhos de poros e a porosidade. Baseia-se no facto de o mercúrio se comportar como um fluido não molhante em relação à maior parte das substâncias. Por consequência o mercúrio não penetra espontaneamente nos poros dos materiais, sendo necessário aplicar-lhe pressão para que tal aconteça. Com o aumento da pressão, o mercúrio é intrudido em poros ou fissuras sucessivamente mais pequenos, havendo uma relação entre o tamanho de poro e a pressão aplicada (quanto menor o tamanho de poro maior será a pressão aplicada). Para cada valor de pressão é feito o registo do volume de mercúrio intrudido, obtendo-se uma curva porosimétrica da qual se pode extrair informação sobre o tamanho e a distribuição de poros.

Para este ensaio utilizaram-se pequenos corpos de prova resultantes da fragmentação de parte dos provetes  $25 \times 25 \times 285 \text{ mm}^3$ , anteriormente utilizados nos ensaios de determinação do módulo de elasticidade.

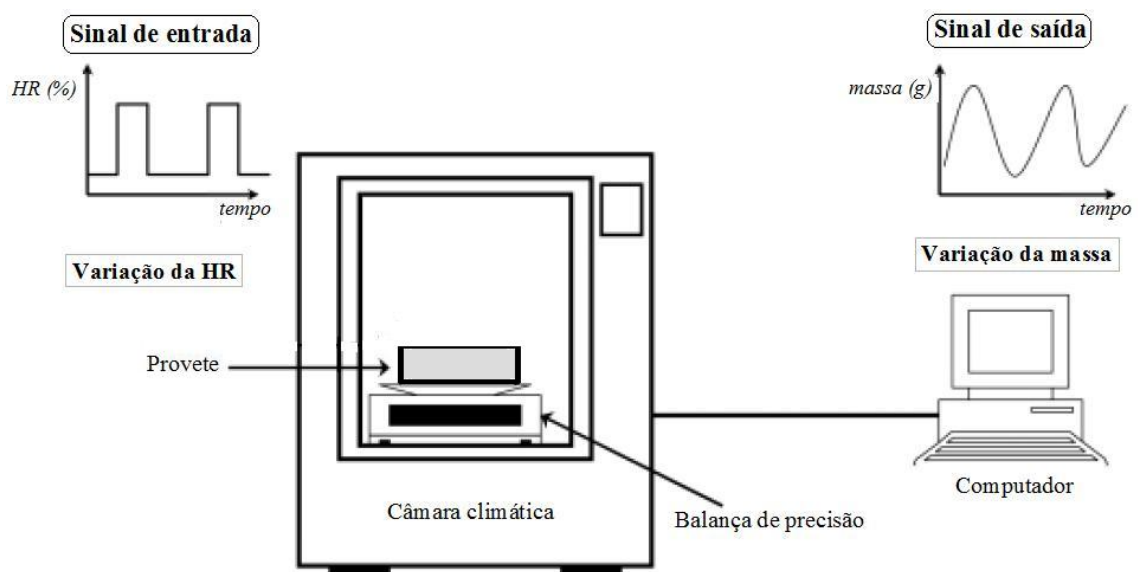
### 3.2.3. Controlo de humidade ( $\text{MBV}_{\text{prático}}$ )

Tal como foi anteriormente referido, o  $\text{MBV}_{\text{prático}}$  [ $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \% \text{HR})$ ] é determinado pela quantidade de vapor de água transportada para dentro ou para fora do material, por unidade de área de superfície e durante um certo intervalo de tempo, quando sujeito a variações da humidade relativa no ambiente circundante. Para tal, colocaram-se provetes em forma de bolacha ( $\varnothing 120 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ) numa balança previamente introduzida no interior de uma câmara climática e fez-se variar a humidade relativa segundo um ciclo que envolve 8 horas de exposição em níveis elevados (75%) e 16 horas em valores reduzidos (33%), repetindo-se este ciclo durante 5 dias. O ensaio foi realizado à temperatura constante de  $25^\circ \text{C}$ . A balança de precisão encontra-se ligada a um computador que regista os valores da massa do provete e permite obter um gráfico da variação de massa vs tempo (Figura 12). De referir a necessidade de isolar, com parafina, as superfícies inferior e laterais do provete de

forma a que as trocas de humidade entre o ar e o material ocorram apenas através da superfície superior da amostra. Este ensaio encontra-se esquematizado na figura 13.



**Figura 12:** a) Câmara climática com balança de precisão; b) Computador responsável pelo registo da variação de massa da amostra;

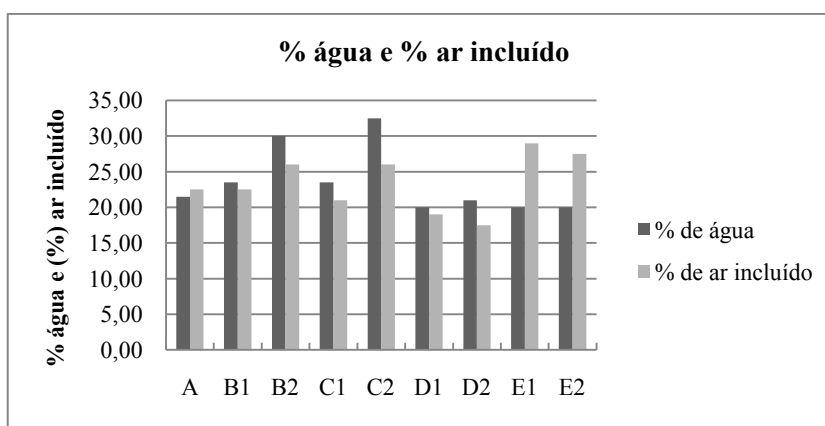


**Figura 13:** Esquema do ensaio de humidade ( $MBV_{prático}$ ).

## 4. Apresentação e discussão dos resultados

### 4.1. Produto em pasta

Os resultados dos ensaios realizados ao amassado estão apresentados nos gráficos 14 e 15, onde se podem observar os valores obtidos para a percentagem de água e de ar incluído, assim como a densidade da argamassa fresca.



**Figura 14:** Percentagem de água e de ar incluído dos amassados.

Pela figura 14, constata-se que a percentagem de água necessária é maior na amassadura com cargas leves, verificando-se que, relativamente à amostra padrão, há aumento considerável da quantidade nos casos em que a percentagem de cargas leves é superior (amostra B2 e C2). Observa-se porém que a percentagem de água é maior na amassadura da amostra com 5% de perlite. Este aumento da percentagem de água com a adição de cargas leves deve-se à baixa densidade da vermiculite e perlite expandida que, devido ao aumento do volume da mistura, obriga a um aumento da quantidade de água necessário para obter uma boa trabalhabilidade do amassado.

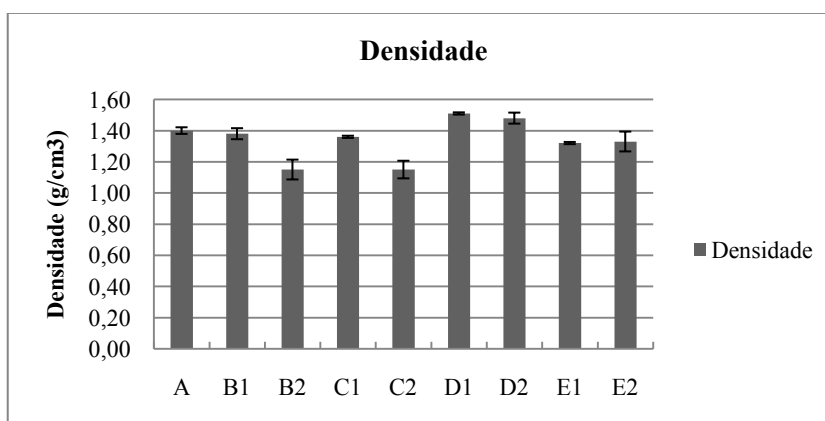
A adição do agente expansivo e do introdutor de ar conduz a uma ligeira diminuição da quantidade de água na amassadura. Esta diminuição deve-se ao facto de haver tendência para a melhoria da homogeneidade e da trabalhabilidade quando se adicionam estes adjuvantes. Caso a percentagem de água fosse igual à utilizada na amostra

padrão. a plasticidade e homogeneidade do amassado seriam insuficientes. A tendência para corrigir estas deficiências seria pelo aumento da razão água/ligante, com óbvios reflexos negativos na argamassa endurecida, nomeadamente em termos de resistência mecânica.

A percentagem de ar incluído nas amostras com cargas leves (amostras B e C) aumenta consideravelmente em relação à amostra padrão (amostra A). Para tal, contribuem o efeito directo da introdução de vermiculite expandida ou perlite expandida com elevada porosidade intrínseca e, de forma menos acentuada, o aumento do volume de vazios nas misturas que contêm as partículas, pouco densas e com formas menos arredondadas, das cargas leves.

Ao contrário do que seria de esperar, a adição do agente expansivo reduz ligeiramente a percentagem de ar incluído no amassado. Isto deve-se à redução da quantidade de água na amassadura que origina o aumento da densidade do amassado e, consequentemente, a diminuição do volume de vazios. Nas amostras D1 e D2 o baixo teor de água do amassado contraria o efeito do agente expansivo, notando-se uma diminuição da percentagem de ar incluído quando seria de esperar evolução contrária.

Tal como seria de esperar, a adição do introdutor de ar provoca um aumento notável do teor de ar incluído no amassado. Este efeito é mais notório se se tiver em conta que a diminuição da quantidade de água na amassadura em relação à amostra padrão poderia, eventualmente, causar um efeito contrário.



**Figura 15:** Densidade dos amassados.

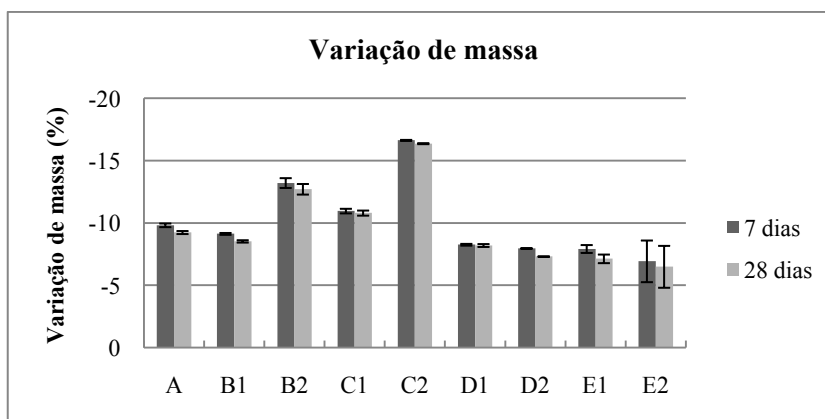


Da análise da figura 15, resulta evidentemente que a adição de cargas leves diminui a densidade do amassado, em especial para 5% de perlite e vermiculite. Este efeito resulta da inferior densidade das cargas leves introduzidas e também do aumento da percentagem de ar incluído. Observa-se que a densidade do amassado regista um ligeiro aumento aquando da introdução de agentes expansivos, de acordo com a referida diminuição da percentagem de ar incluído. Os amassados que contêm introdutor de ar apresentam ligeira diminuição de densidade, causada pela introdução de bolhas de ar. É possível que a redução da percentagem de água da amassadura tenha amortizado a diminuição de densidade imposta pelo introdutor de ar.

## **4.2. Produto endurecido**

### **4.2.1. Variação de massa**

As variações de massa ocorridas após 7 e 28 dias de cura estão apresentadas na figura 16.



**Figura 16:** Variação de massa após 7 e 28 dias de cura.

De uma forma geral, observa-se diminuição da massa com o tempo de cura dos provetes, resultante da perda de água durante o processo de cura. A perda de massa é mais acentuada nos primeiros dias e diminui de forma decrescente com o tempo de cura, havendo tendência para a estabilização da massa dos provetes. Constata-se que em todas as

amostras há um ligeiro ganho de massa entre os 7 dias e os 28 dias de cura. Para tal contribuem a absorção de vapor de água do meio ambiente e, principalmente, a reacção de carbonatação, durante a qual a amostra endurece por reacção com o dióxido de carbono existente na atmosfera. Convém lembrar que as argamassas são bastardas.

A variação de massa dos provetes é mais acentuada nos casos em que se adicionam cargas leves, notando-se maior perda de peso quando a percentagem adicionada é de 5%. Esta variação de massa deve-se à perda de água durante o processo de cura e, naturalmente superior em misturas preparadas com superior teor de água de amassadura.

Nos casos em que se adicionaram agentes expansivos (amostras D) e introdutores de ar (amostras E) a perda de massa é menor que nos outros casos, de novo em virtude de ser menor a quantidade de água de amassadura.

#### 4.2.2. Variação dimensional

As variações dimensionais ocorridas após 7 e 28 dias de cura estão apresentadas na figura 17.

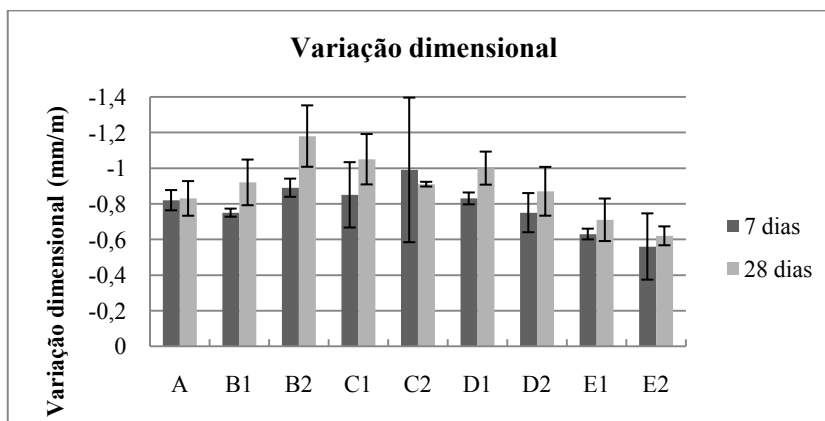


Figura 17: Variação dimensional após 7 e 28 dias de cura.

Esta variação é consequência da perda de água de amassadura por evaporação e das reacções de hidratação do cimento e carbonatação dos hidróxidos de cálcio e magnésio.

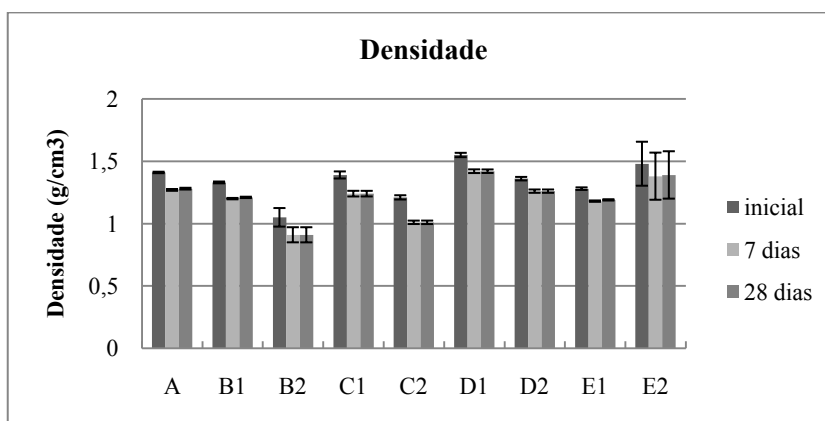
Contudo, o primeiro fenómeno deve ser dominante e origina, ao contrário do segundo, ganho de massa.

As várias amostras que apresentam maior variação dimensional ao fim de 28 dias de cura são as que contêm vermiculite ou perlite, uma vez que a introdução de cargas leves exigiu aumento da percentagem de água de amassadura e, conseqüentemente, acentua-se a perda de água durante a cura. Também por isso, as amostras E1 e E2 sofrem menor retracção que a amostra padrão, justificada pela menor quantidade de água de amassadura.

Estranhamente, as amostras em que se introduziram agente expansivo apresentam retracção superior à amostra padrão. Seria de esperar que o agente expansivo controlasse a retracção. No entanto, a margem de erro nas medições é capaz de justificar esta incongruência.

### 4.2.3. Densidade

A densidade das amostras nos instantes após a desmoldagem e após 7 e 28 dias de cura é mostrada na figura 18.



**Figura 18:** Densidade das amostras no momento da desmoldagem e após 7 e 28 dias de cura.

Em todas as argamassas, a densidade máxima foi registada no momento após a desmoldagem, que corresponde ao momento em que a perda de água é ainda incipiente. Ao fim de 7 dias de cura, a densidade das amostras diminui, fortemente influenciada pela

perda de água registada durante a cura. Nos períodos seguintes, a densidade tende a estabilizar ou a aumentar ligeiramente, em resultado da hidratação do cimento ou do ganho de massa por carbonatação.

Tal como seria de esperar, as amostras menos densas são as que contêm vermiculite e perlite, principalmente quando se usam maiores teores (amostras B2 e C2). Ao efeito directo das cargas leves junta-se a maior perda de água durante a cura, uma vez que houve aumento da percentagem de água de amassadura que origina o aumento da porosidade da argamassa.

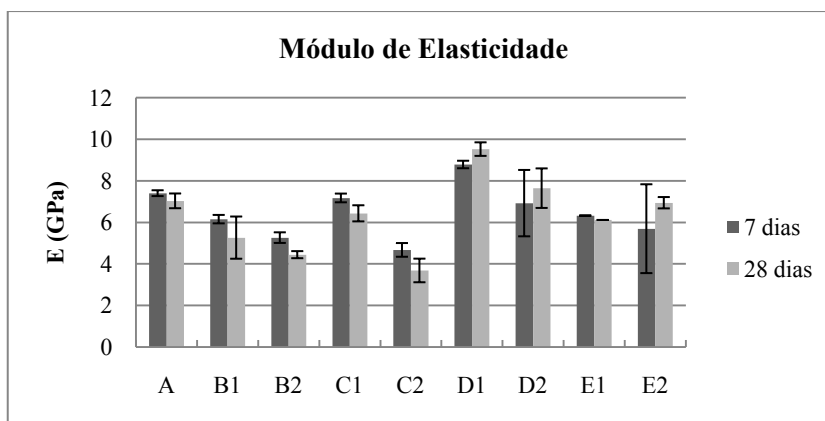
A introdução de agente expansivo em percentagem reduzida (amostra D1) provoca aumento da densidade. No entanto, o material contendo maior percentagem desse adjuvante (amostra D2) possui densidade semelhante à amostra padrão.

No que diz respeito à adição de introdutor de ar, verifica-se uma diminuição da densidade quando a percentagem adicionada é de 0,025% e um aumento quando a percentagem adicionada é de 0,05% (no entanto este último tem maior desvio padrão. Ao contrário do que acontece, seria de esperar que a adição do agente expansivo e do agente introdutor de ar diminuísse a densidade do produto endurecido. Contudo, a ligeira diminuição da quantidade de água de amassadura poderá ter influenciado a evolução da densidade e da porosidade da argamassa. A redução da percentagem de água no amassado origina menor perda de água durante a cura e, consequentemente, cria menor volume de poros no produto endurecido (a perda de água durante a cura da argamassa origina espaços vazios no interior do corpo sólido). Desta forma, pode dizer-se que o efeito da diminuição da água de amassadura se sobrepôs ao efeito dos agentes expansivo e introdutor de ar, assumindo-se como a principal causa para a evolução registada.

Para se verificar o efeito do agente expansivo e do introdutor de ar de forma isolada dever-se-ia fixar a quantidade de água de amassadura. Contudo, manter a percentagem de água aquando da adição do agente expansivo ou do introdutor de ar prejudicaria a trabalhabilidade da argamassa fresca, pois estes adjuvantes tendem a melhorar a plasticidade e homogeneidade do amassado, justificando-se dessa forma a redução da percentagem de água de amassadura.

#### 4.2.4. Módulo de elasticidade

Os valores do módulo de elasticidade das amostras após 7 e 28 dias de cura estão apresentados na figura 19.



**Figura 19:** Módulo de elasticidade após 7 e 28 dias de cura.

A par da amostra padrão, as amostras com adição de vermiculite e perlite possuem módulo de elasticidade que tende a diminuir de 7 para 28 dias de cura, podendo-se desta forma prever que a resistência mecânica destas amostras diminui com o tempo de cura. Por outro lado, as amostras com agente expansivo (amostras D) apresentam tendência oposta. No caso das amostras com introdutores de ar, nota-se um aumento do módulo de Young aos 28 dias de cura, devendo-se assinalar que este resultado está associado, no entanto, a um elevado erro.

A adição de cargas leves origina diminuição do módulo de elasticidade relativamente à amostra padrão, sendo o efeito mais acentuado com teores superiores. Esta característica está fortemente associada à densidade, pois as argamassas com menor densidade são menos compactas e menos resistentes mecanicamente.

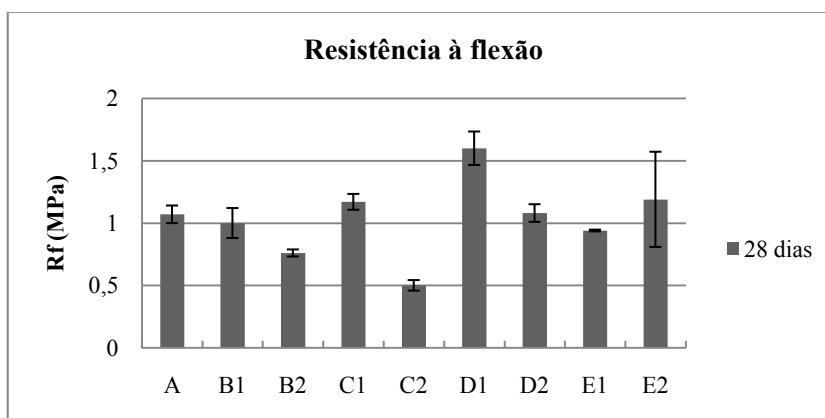
Nota-se um aumento do módulo de elasticidade dinâmico com a introdução do agente expansivo, principalmente para baixas quantidades de aditivo. Este resultado deve-se ao aumento de densidade da argamassa em relação à amostra padrão.

As amostras com introdutor de ar possuem módulo de Young ligeiramente superior às amostras padrão, em especial aos 28 dias de cura e quando se adicionou maior quantidade de agente porogéneo (amostra E2). O aumento da densidade explica esta evolução.

Seria de esperar que as adições do agente expansivo e do introdutor de ar diminuíssem o módulo de elasticidade, pois estes adjuvantes introduzem bolhas de ar na argamassa. No entanto, a redução do teor de água na amassadura acaba por dominar.

#### 4.2.5. Resistência à flexão

Os valores da resistência à tracção por flexão das amostras curadas durante 28 dias estão apresentados na figura 20.



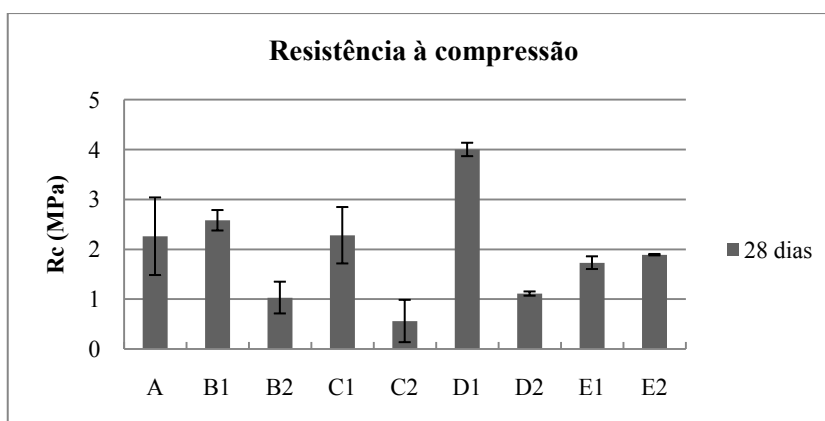
**Figura 20:** Resistência à flexão após 28 dias de cura.

Observa-se que a introdução de cargas leves diminui a resistência à tracção por flexão, sendo perceptível que essa diminuição é maior quando a quantidade de cargas leves aumenta. Verifica-se ainda um aumento da resistência à flexão nas amostras em que se adicionou menor quantidade de agente expansivo e na amostra com maior percentagem de introdutor de ar. Pelo cruzamento destes resultados com os da densidade nota-se uma tendência para que a resistência à flexão varie de forma proporcional à densidade, ou seja, as argamassas mais densas e mais compactas têm superior resistência à flexão. De assinalar

que o aumento da densidade nas amostras D e E não se deve à adição de agente expansivo e introdutor de ar, mas sim à diminuição da percentagem de água de amassadura.

#### **4.2.6. Resistência à compressão**

Os valores da resistência à compressão das amostras curadas durante 28 dias mostram-se na figura 21.



**Figura 21:** Resistência à compressão após 28 dias de cura.

A introdução de cargas leves leva à diminuição da densidade e da coesão das argamassas, e consequentemente à diminuição da resistência à compressão. Estes efeitos são mais notórios quando há um incremento da percentagem de vermiculite (amostra B2) ou perlite (amostra C2). Nas amostras B1 e C1 a densidade é idêntica à registada na amostra padrão, originando níveis de compactação e resistência à compressão semelhantes.

A amostra D1 é mais densa que a amostra padrão, o que indicia uma melhoria na compactação e coesão do corpo endurecido. Desta forma, é compreensível a melhoria da resistência à compressão, bem como o aumento do módulo de elasticidade dinâmico antes indicado. Na amostra D2 (com maior percentagem de agente expansivo) há uma diminuição da resistência à compressão. Seria de esperar que este efeito fosse causado pela adição do agente expansivo, no entanto os resultados obtidos para a densidade demonstram que a argamassa se mantém compacta e que, ao contrário do que acontece, a resistência à

compressão não deveria sofrer alterações significativas. Os valores da resistência à compressão das amostras D1 e D2 são estranhamente divergentes, sendo expectável que a sua leitura esteja associada a erros de medição ou má homogeneização da mistura.

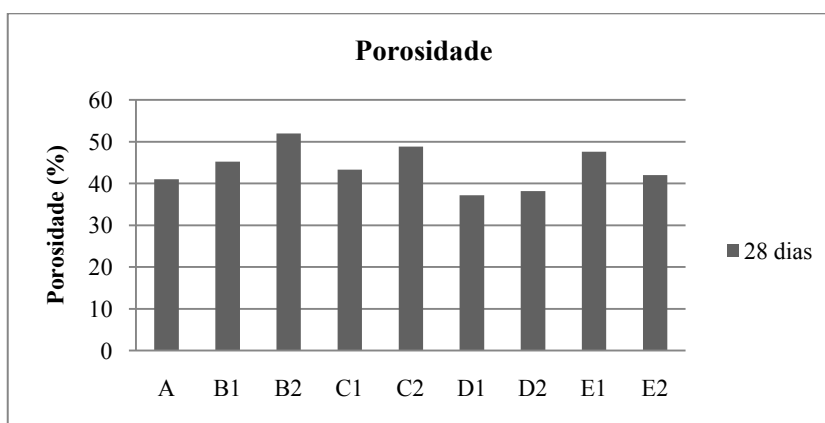
Na amostra E1 a redução da densidade em relação à amostra padrão justifica a diminuição da resistência à compressão.

Nas amostras E2 houve uma ténue diminuição da resistência à compressão. Tal como na amostra D2, esta diminuição era expectável, uma vez que a criação de bolhas de ar induz descontinuidade na compactação do material. No entanto, o verificado aumento de densidade não acompanha as expectativas.

#### **4.2.7. Porosidade**

A análise da porosidade é dividida em duas partes. Fez-se uma avaliação da percentagem total de poros em cada amostra, complementada pela avaliação da distribuição dos tamanhos de poros (porosimetria de mercúrio).

A porosidade total das amostras, curadas durante 28 dias, estudada por porosimetria de mercúrio está apresentada na figura 22.



**Figura 22:** Porosidade das amostras em estudo.

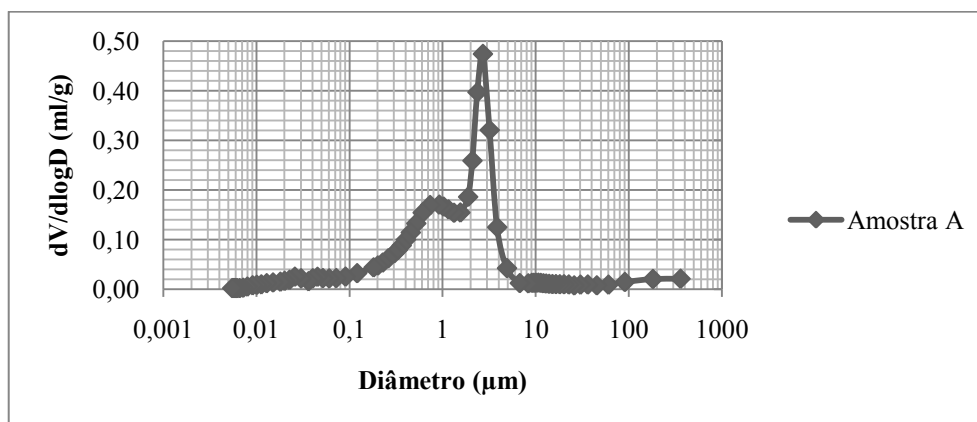


Como era de prever, a porosidade das amostras aumenta com a adição de cargas leves. Para tal contribuíram o efeito directo da introdução de corpos porosos e o aumento do teor de água de amassadura.

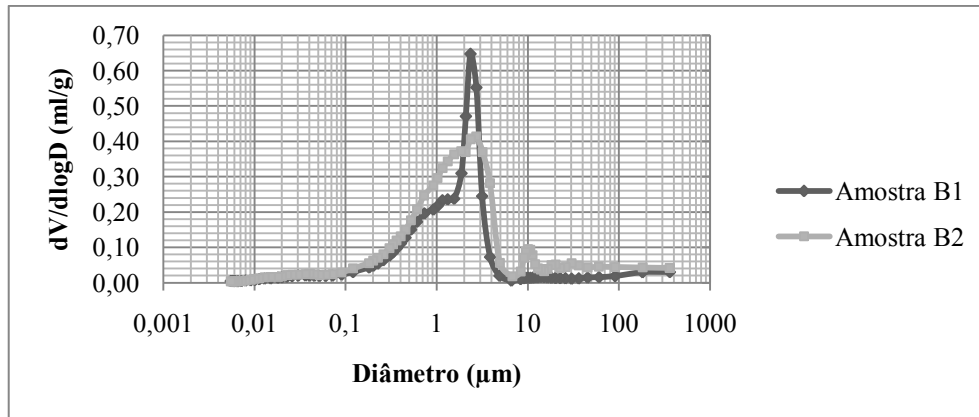
Uma vez que as amostras D1 e D2 são mais densas, é lógico verificar que apresentam valores de porosidade inferiores.

As amostras E1 e E2 são mais porosas que as anteriores, uma vez que a adição de introdutores de ar cria vazios no interior da argamassa. No entanto, cruzando estes resultados com os valores de densidade, seria de esperar que estas amostras fossem menos porosas que a amostra padrão. Aparentemente, não há uma explicação para o aumento da porosidade nas amostras E1 e E2, podendo tal resultado dever-se a um erro associado à medição da porosidade ou da densidade, talvez causado pela heterogeneidade das amostras.

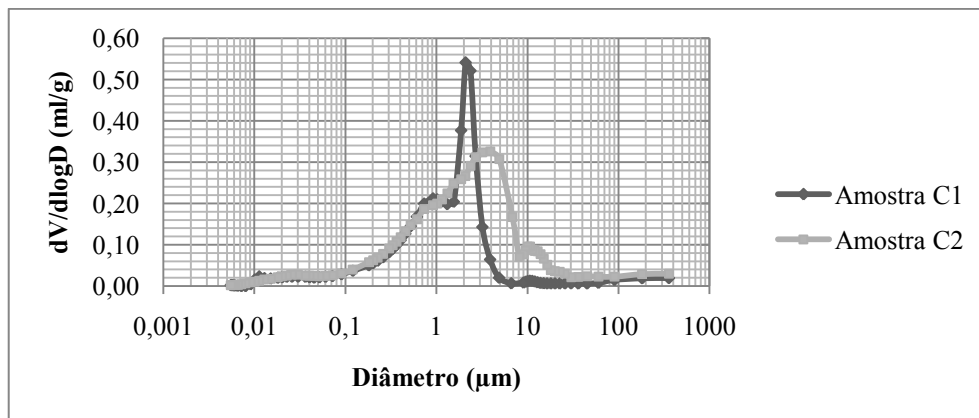
As figuras 23-27 mostram a distribuição do volume dos poros em função do seu diâmetro.



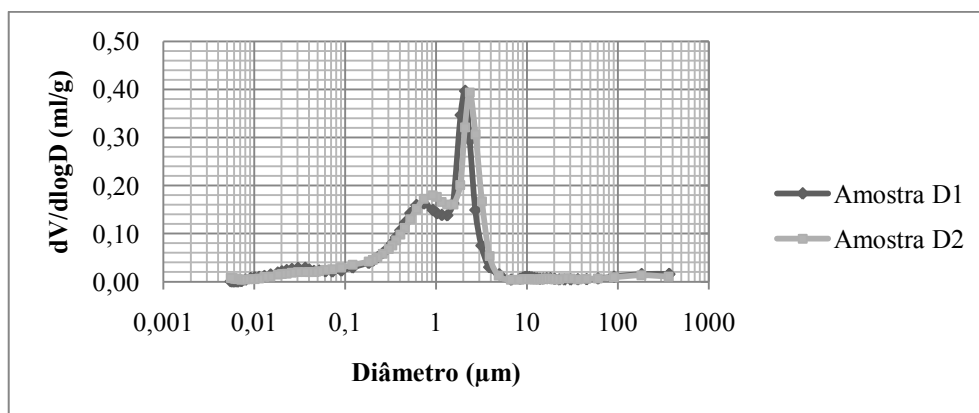
**Figura 23:** Distribuição do volume de poros da amostra padrão.



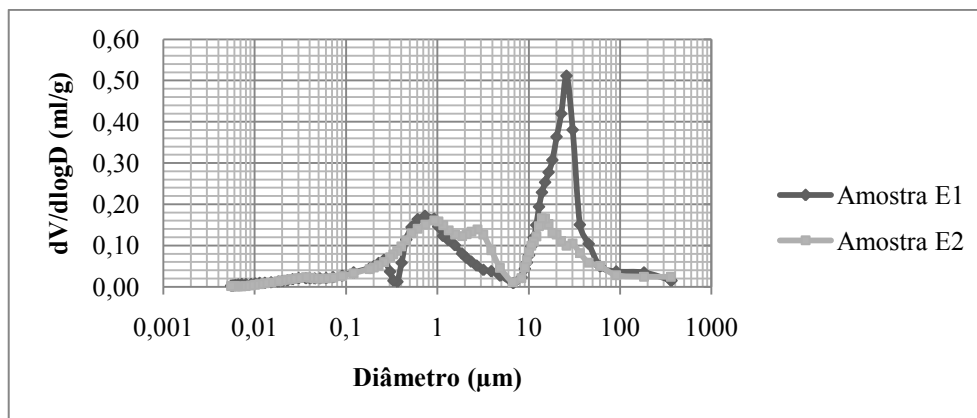
**Figura 24:** Distribuição do volume de poros na amostra com 2% e 5% de vermiculite (B1 e B2, respectivamente).



**Figura 25:** Distribuição do volume de poros na amostra com 2% e 5% de perlite (C1 e C2, respectivamente).



**Figura 26:** Distribuição do volume de poros na amostra com 0,05% e 0,10% de agente expansivo (D1 e D2, respectivamente).



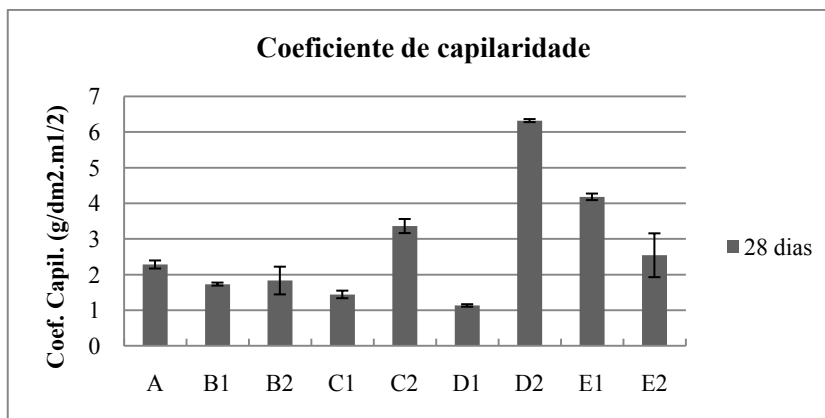
**Figura 27:** Distribuição do volume de poros na amostra com 0,025% e 0,05% de agente introdutor de ar (E1 e E2, respectivamente).

As amostras C1, D1 e D2 possuem diâmetros médios de poros mais pequenos que a amostra padrão, ao passo que as amostras E1 e E2 mostram distribuição bimodal, com existência de poros de maiores dimensões ( $> 10\mu\text{m}$ ). Verifica-se que a amostra C2 tem também poros de maiores dimensões que a amostra padrão. Nas restantes amostras, o diâmetro médio de poros é idêntico à argamassa padrão.

A predominância de poros de menores dimensões (amostras C1, D1 e D2) é benéfica, uma vez que aumenta o poder higroscópico do material e, consequentemente, melhora a capacidade de controlo de humidade da argamassa. Por outro lado, os poros grandes das amostras C2, E1 e E2 têm menor poder higroscópico que os poros de menores dimensões. No entanto, a formação de poros de grandes dimensões nas amostras E1 e E2 poderá não implicar uma redução muito acentuada na capacidade de controlo de água, pois a distribuição bimodal assegura a existência de poros de menores dimensões com elevado poder higroscópico.

#### 4.2.8. Coeficiente de absorção de água por capilaridade

Os valores dos coeficientes de absorção de água por capilaridade de amostras curadas 28 dias indicam-se na figura 28.

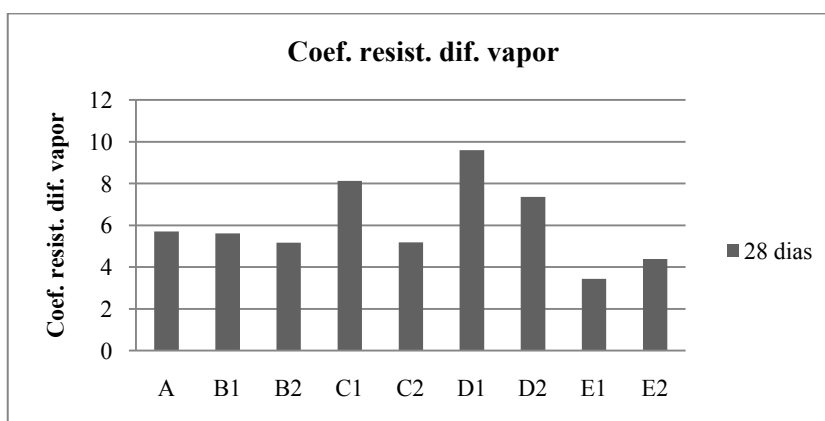


**Figura 28:** Coeficiente de absorção de água por capilaridade após 28 dias de cura.

Tendo como referência a amostra padrão, o coeficiente de capilaridade é superior nas amostras D2, E1 e C2, sendo menor nas amostras C1 e D1. Tendo em conta que a absorção de água é dependente da porosidade, de uma forma geral os valores do coeficiente de capilaridade não são coerentes com aquele parâmetro. A grande discrepância de resultados entre as amostras semelhantes (exemplo D1 e D2) impõe sérias reservas no rigor das medições e sugere prudência na sua interpretação.

#### 4.2.9. Coeficiente de resistência à difusão de vapor

Os valores do coeficiente de resistência à difusão de vapor de amostras curadas durante 28 dias mostram-se na figura 29.



**Figura 29:** Coeficiente de resistência à difusão de vapor após 28 dias de cura.

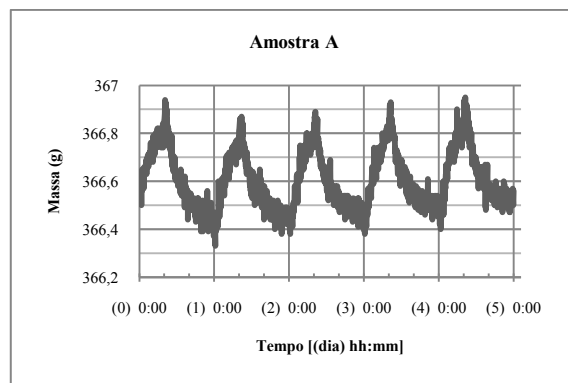
Estes valores permitem avaliar o grau de dificuldade com que o vapor de água atravessa, por difusão, uma amostra, quando sujeita a uma diferença de pressão de vapor entre as duas faces. Pela figura 29 constata-se que de entre as várias amostras com adição de cargas leves as que oferecem menor resistência à passagem do vapor de água são as amostras B2 e C2 (com maior teor de cargas leves). Tendo em conta que a porosidade da argamassa aumenta com a adição de cargas leves, esta evolução era esperada. O aumento da porosidade facilita a existência de conectividade entre poros. Das várias amostras com cargas leves, a amostra C1 é a que tem menor porosidade, daí que registe também o maior coeficiente de resistência à difusão de vapor.

As amostras em que se adicionou agente expansivo (D1 e D2) são as mais densas e, por esse motivo, as que oferecem resistência à difusão de vapor de água, sendo este efeito mais notório na amostra D1.

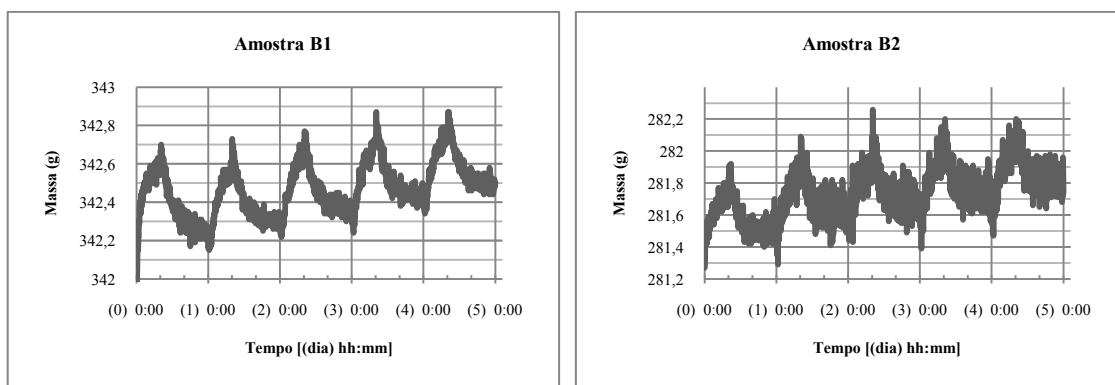
As amostras em que se adicionou o agente introdutor de ar (E1 e E2) possuem baixos coeficientes de resistência à difusão de vapor. Embora a adição do introdutor de ar tenha sido acompanhada por uma diminuição da quantidade de água de amassadura e, conseqüentemente, por aumento da densidade do corpo endurecido, a porosidade é ligeiramente superior à amostra padrão (formaram-se poros de dimensões superiores). A diminuição do coeficiente de resistência à difusão de vapor indicia a existência de interligações entre os canais porosos.

### **4.3. Controlo de humidade (MBV)**

No ensaio de controlo de humidade o material é colocado num ambiente com mudanças cíclicas daquela variável, durante 5 dias: 8 horas num ambiente de 75% de humidade relativa + 16 horas num ambiente de 33% de humidade relativa. Como resposta a estas variações, registaram-se alterações nos valores da massa das amostras, apresentadas nas figuras 30-34.



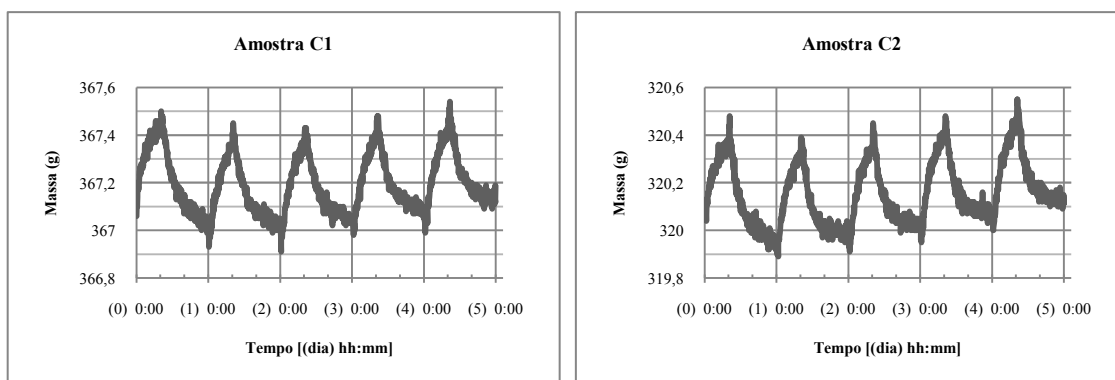
**Figura 30:** Variação da massa da amostra A durante o ensaio de controlo de humidade.



**a)**

**b)**

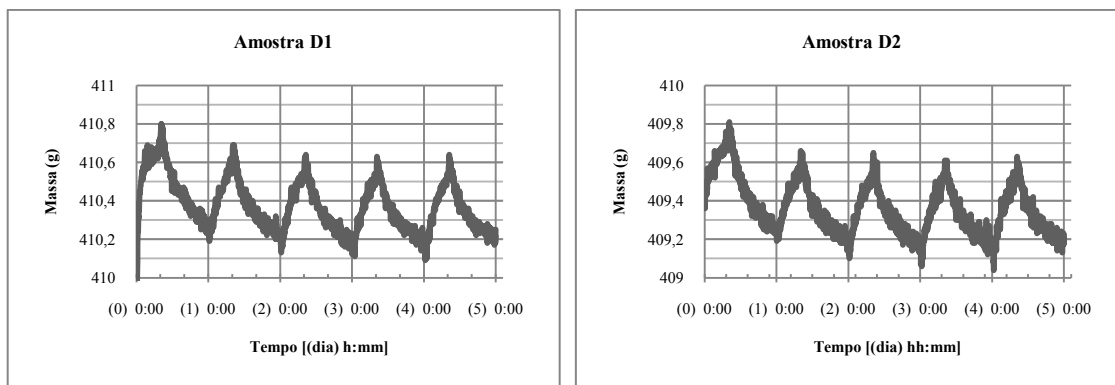
**Figura 31:** Variação da massa da amostra B1 (a) e B2 (b) durante o ensaio de controlo de humidade.



**a)**

**b)**

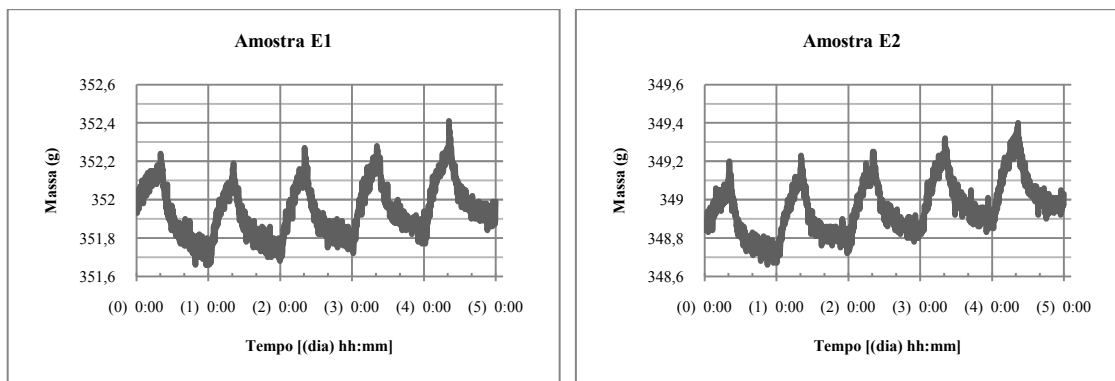
**Figura 32:** Variação da massa da amostra C1 (a) e C2 (b) durante o ensaio de controlo de humidade.



a)

b)

**Figura 33:** Variação da massa da amostra D1 (a) e D2 (b) durante o ensaio de controlo de humidade.



a)

b)

**Figura 34:** Variação da massa da amostra E1 (a) e E2 (b) durante o ensaio de controlo de humidade.

Observa-se, com excepção das amostras D1 e D2, uma tendência clara para o aumento do peso com o tempo de ensaio, o que traduz maior dificuldade em libertar humidade que em absorver (fenómeno de histereses). Isto conduz à saturação de humidade no revestimento e à diminuição da sua capacidade de actuar como elemento controlador de humidade do ar.

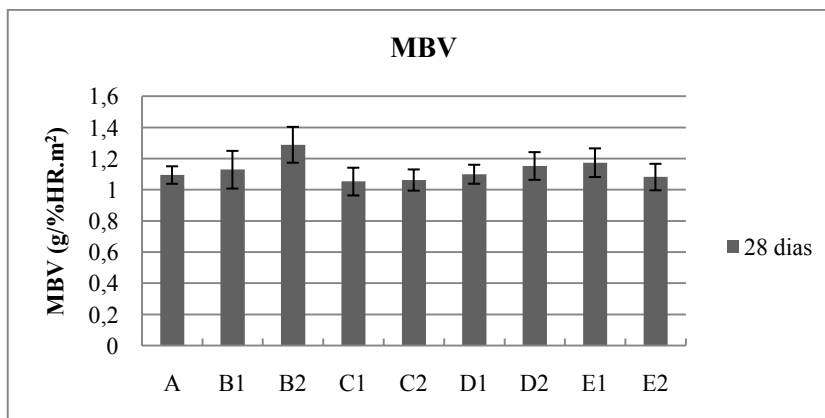
As amostras D1 e D2 evidenciam uma tendência para a diminuição da massa com o tempo de ensaio, indicando maior facilidade de libertar humidade que as restantes amostra.

Isto permite aferir que as amostras referidas têm a vantagem de não saturarem tão rapidamente como as outras amostras.

Sabendo-se que o diâmetro da amostra é de 12cm, a área de superfície disponível para troca de humidade com o ar será de aproximadamente  $0,011\text{m}^2$ . Conhecendo-se a amplitude da variação de humidade (42%) e o valor de ganho/perda de massa das amostras durante o ciclo de ensaio, é possível calcular o valor do MBV [ $\text{g}/(\%\text{HR}.\text{m}^2)$ ]. É de assinalar a exclusão dos valores registados no primeiro dia de ensaio, caracterizados por alguma instabilidade a traduzir afastamentos das condições de equilíbrio

A temperatura de teste, a espessura do revestimento, o acabamento superficial e a ventilação na câmara podem influenciar o valor do MBV. Por isso, estas variáveis foram mantidas constantes.

Os valores de MBV estão indicados nas figuras 35 e 36. Na figura 35 mostram-se os valores médios de todo o processo (absorção + libertação), enquanto a figura 36 mostra separadamente os valores médios registados durante a absorção e durante libertação de humidade.



**Figura 35:** MBV das amostras em estudo aos 28 dias de cura.

Pela análise da figura 35 verifica-se que os maiores valores de MBV são registados com as amostras B1, D2, E2 e, em especial, com B2. As restantes amostras não apresentam melhorias em relação à argamassa padrão, observando-se até pior desempenho de algumas



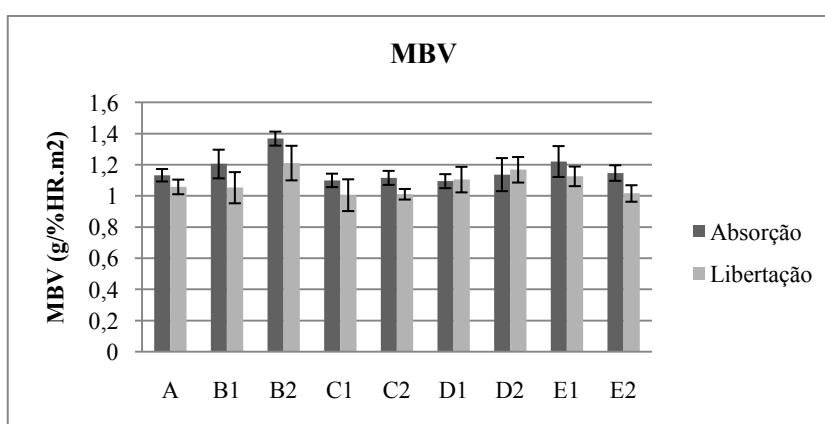
no controlo de humidade ambiente. Nas situações em que houve aumento de MBV, essa melhoria foi ligeira.

A introdução de vermiculite conduz ao aumento da porosidade e à redução do coeficiente de resistência à difusão de vapor, sem que isso altere significativamente o tamanho médio dos poros. Estas características significam que a argamassa tem maior volume de poros higroscópicos e que a porosidade é tendencialmente comunicante, podendo contribuir para absorver e libertar maior quantidade de vapor da água. Assim, o MBV da amostra aumenta e, conseqüentemente, a capacidade de controlar a humidade ambiente é melhorada.

Apesar da adição de perlite aumentar a porosidade das amostras (C1 e C2), o MBV registado é semelhante ao da argamassa padrão. Com base nos valores de porosidade, de distribuição de tamanhos de poros e de coeficiente de resistência à difusão de vapor de água, pode-se concluir que o aumento da porosidade registada na amostra C2 resulta essencialmente da formação de poros grandes. Estes poros de maiores dimensões são pouco higroscópicos e, conseqüentemente, não garante capacidade de controlar a humidade do ar. Na amostra C1 a porosidade é menor que na amostra C2 e ligeiramente maior que na amostra padrão, notando-se pela figura 25 que os poros formados são mais pequenos que na amostra C2. Desta forma, a justificação para o não aumento do MBV poderá residir na elevada resistência à difusão de vapor que indica que os poros não são comunicantes.

Nas amostras D1 e D2 (em que se adicionou agente expansivo) não se verificam aumentos significativos do MBV, notando-se que há um ligeiro aumento deste valor na amostra D2. Embora os valores da porosidade em D1 e D2 sejam os mais baixos de todas as amostras e os coeficientes de resistência à difusão de vapor sejam dos mais elevados (canais porosos pouco interligados), o MBV aqui registado não é o mais baixo de entre todas as argamassas. Tal facto poderá ser justificado pelo elevado número de poros pequenos, uma vez que houve uma ligeira diminuição do tamanho médio de poro em comparação com a amostra padrão. Desta forma, a diminuição da porosidade e o aumento do coeficiente de resistência à difusão de vapor é compensada pela formação de poros com menor diâmetro, de superior poder comunicante.

Nas amostras em que se adicionou o agente introdutor de ar, verifica-se ligeira melhoria na amostra E1, enquanto na amostra E2 o MBV é idêntico ao da amostra padrão. Ambas as amostras têm maior volume de poros grandes que a amostra padrão, principalmente a amostra E1. No entanto, estes poros têm baixo poder higroscópico e, consequentemente, baixa capacidade de absorver e libertar humidade. Ainda assim, esta característica é compensada pelo aumento da porosidade e pela diminuição do coeficiente de resistência à difusão de vapor.



**Figura 36:** MBV da absorção e libertação de humidade nas amostras com 28 dias de cura.

Pela figura 36 observa-se que, com excepção das amostras D1 e D2, todas as amostras têm maior capacidade para absorver humidade no período de exposição em ambiente húmido do que para libertar a humidade durante as 16 horas em que estão expostas a 33% de humidade relativa do ar. Este fenómeno é conhecido como histerese e traduz maior dificuldade de secagem relativamente ao humedecimento. Este efeito é mais acentuado se se tiver em conta que o tempo de secagem é maior que o tempo de humedecimento.

Nas amostras D1 e D2 a variação de massa é maior durante a secagem (HR=33%) do que no humedecimento (HR=75%). No entanto, não se pode afirmar que estas amostras não apresentem histereses, pois o tempo de secagem é maior que o tempo de humedecimento. Regista-se, todavia, que as amostras D1 e D2 têm maior aptidão para

libertar a humidade que as restantes amostras. Isto é vantajoso pois a argamassa não fica saturada de humidade.

Tal como já foi referido, a argamassa com maior capacidade de controlo de humidade é a amostra B2, cuja composição contém 5% de vermiculite, seguida das amostras E1 e D2.

Comparando estes resultados com os valores registados no projecto NordTest (Tabela 2), observa-se que o comportamento das argamassas agora ensaiadas é promissor. O melhor MBV obtido no presente trabalho é superior a todos os valores registados no projecto NordTest, sendo de assinalar que de entre os vários materiais de construção analisados no projecto NordTest estão alguns com elevada porosidade, tais como as placas de acabamento em madeira, o betão celular ou mesmo o gesso. Actualmente, estes materiais de construção actuam como controladores de humidade sem que essa seja a função para que foram projectados.

Segundo a tabela 1, todas as amostras apresentam bons desempenhos, uma vez que os valores de MBV situam-se entre 1 e 2 g/(%HR.m<sup>2</sup>).

A amostra padrão é uma argamassa muito porosa e um bom ponto de partida para esta função. As novas argamassas formuladas a partir daquela possuem, por isso, elevada capacidade de controlo de humidade em ambiente fechado.



## 5. Conclusões e propostas de trabalho futuro

No presente trabalho partiu-se de uma argamassa de cal aérea (a que se deu o nome de padrão) e adicionaram-se vários tipos de adjuvantes em quantidades distintas, com a finalidade de aumentar a porosidade e ajustar a distribuição de tamanhos de poros, de forma a garantir capacidade de controlo de humidade em ambientes internos. A argamassa padrão é constituída por cimento e cal. Os vários adjuvantes utilizados (vermiculite expandida, perlite expandida, agente expansivo e introdutor de ar) provocaram, naturalmente, alterações na estrutura e propriedades das argamassas.

De uma forma geral observa-se que a porosidade e a densidade são fortemente dependentes da percentagem de água de amassadura. O aumento do teor de água conduz à formação de mais espaços vazios no material endurecido, uma vez removido o excesso de água, por evaporação, durante o período de cura. Porém não se pode desprezar o efeito directo dos adjuvantes na porosidade, uma vez que todos os adjuvantes utilizados têm como principal função aumentar a estrutura porosa da argamassa. É o caso das amostras em que se adicionaram cargas leves. Já nas argamassas em que se adicionou agente expansivo ou introdutor de ar o expectável aumento de porosidade é contrariado pela diminuição da percentagem de água de amassadura. De referir que as variações da quantidade de água de amassadura são impostas pela necessidade de acertar a trabalhabilidade e a consistência do amassado, que variam conforme o tipo e a percentagem de adjuvante adicionado.

O maior aumento de porosidade em relação à argamassa padrão verifica-se nas amostras B2, C2 e E1. No entanto, o aumento de porosidade pode ser conseguido à custa de poros de maiores dimensões, não actantes no controlo de humidade. É o que parece ter acontecido na amostra com 5% de perlite (C2) e nas amostras com introdutores de ar (E1 e E2).

O módulo de elasticidade, a resistência à compressão e a resistência à flexão são propriedades mecânicas muito dependentes da densidade das argamassas. Materiais mais porosos são mais frágeis mecanicamente.

Embora os valores do coeficiente de absorção de água por capilaridade sejam pontualmente condizentes com os restantes resultados, não permitem tirar conclusões coerentes com as outras observações.

O coeficiente de resistência à difusão de vapor avalia o grau de interconexão entre os poros, sendo dependente do volume e tamanho dos poros.

Na avaliação da capacidade de controlar a humidade, realizado segundo o procedimento utilizado no método NordTest, obtiveram-se resultados interessantes. O maior valor de MBV foi obtido com a amostra em que se adicionou 5% de vermiculite (B2), mas as amostras D2 e E1 apresentam também bom desempenho. A amostra E1 é muito porosa e tem baixo coeficiente de resistência à difusão de vapor. A amostra D2, embora seja das menos porosas e tenha, por isso, superior coeficiente de resistência à difusão de vapor que a amostra padrão, é constituída por poros de menor dimensão. Apesar de ser constituída por poros de dimensões maiores que as restantes amostras, E1 possui volume de poros relativamente elevado e baixo coeficiente de resistência à difusão de vapor de água.

Segundo a classificação proposta no método NordTest, todas as amostras apresentam bom desempenho, uma vez que têm um MBV situado no intervalo entre 1 e 2  $\text{g}/(\%\text{HR.m}^2)$ .

Pode-se concluir que todas as argamassas ensaiadas têm boa capacidade de troca de humidade com o ambiente circundante. Como antes se disse, o comportamento da mistura B2 é óptimo. Esta argamassa tem um custo relativamente baixo, é de aplicação simples e pode ser colorida conforme os gostos do cliente, motivos que podem despertar o interesse comercial para projectos em que se pretenda controlar a humidade no interior dos compartimentos de forma passiva.

Num trabalho futuro, seria interessante realizar um estudo centrado nos efeitos que a adição de vermiculite produz sobre a capacidade de controlo de humidade da argamassa, uma vez que nestas amostras se registaram os melhores resultados. Para tal, seria aconselhável que se efectuassem estudos em argamassas de cal (provavelmente tendo como ponto de partida a amostra padrão) com várias percentagens de vermiculite, de forma a potenciar a capacidade de controlo de humidade da argamassa de revestimento.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] Paulo, R.; “Caracterização de argamassas industriais”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2006.
- [2] Moropoulou, A.; Bakolas, A.; Anagnostopoulou, S.; “Composite materials in ancient structures”, *Cement and Concrete Composites*, 27, 2005, 295-300.
- [3] Sabbioni, C.; Bonazza, A.; Zappia, G.; “Damage on hydraulic mortars: the Venice Arsenal”, *Journal of Cultural Heritage*, 3, 2002, 83-88.
- [4] Lanas, J.; Pérez-Bernal, J.L.; Bello, M.A.; Alvarez Galindo, J.I.; “Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars”, *Cement and Concrete Research* 34, 2004, 2191-2201.
- [5] Smith, M.R.; Collis, L.; “Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes”, Geological Society, England, 1993.
- [6] Veiga, M.R.; “Comportamento das argamassas de revestimento de paredes – Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação”, Dissertação de Doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 1998
- [7] Agostinho, C. S.; “Estudo da Evolução do Desempenho no Tempo de Argamassas de Cal Aérea”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, IST/UTL, 1998;
- [8] Marques, S; “Estudo das Argamassas de Reabilitação de Edifícios Antigos”, Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2005;
- [9] Cavaco, L.S.R.G, “Técnicas de aplicação de argamassas de revestimento em edifícios antigos. Influência no desempenho”. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Lisboa, IST/UTL, 2005.
- [10] Warren, John; “Conservation of Brick”, Cap. 12 – Mortars, Renderings and Plasters, Butterworth Heinemann, England, 1999.
- [11] Coutinho, A. Sousa; “Fabrico e propriedades do betão”, Volume I – Propriedades das matérias-primas, Volume II – Fabrico, Lisboa, 1998.

- [12] Domone, P.L., “Construction Materials – Their nature and behavior”, Part 3 – Concrete, Second Edition, England, 1994
- [13] Edmeades, R.M.; Hewlett, P.C; “Lea’s Chemistry of Cement and Concrete”, Cap. 15 – Cement Admixtures, 4<sup>th</sup> Edition, England, 1998.
- [14] Veiga, M.R., “Caracterização experimental de argamassas para revestimento de paredes de edifícios antigos”, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Dezembro de 1993.
- [15] Rode, C.; “Moisture Buffering of Building Material”, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, 2005.
- [16] Janssen, H.; Roels, S.; “Qualitative and quantitative assessment of interior moisture buffering by enclosures”, Energy and Buildings, 41, 2009, 382-394
- [17] Osanyintola, O.F.; Simonson, C.J. “Moisture buffering capacity of higroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact”, Journal Energy and Buildings, 38, 2006, 1270-1282
- [18] Cerolini, S.; D’Orazio, M.; Perna, C.D.; Stazi, A.; “Moisture buffering capacity of highly absorbing materials”, Energy and Buildings, 41, 2009, 164-168
- [19] Ramos, N.M.M.; Delgado, J.M.P.Q.; Freitas, V.P.; “Modelling and Solving building Physics Problems using MATLAB/Simulink”, The International Journal of Engineering Science, volume 21, 5, 2005, 784-789.
- [20] Magalhães, A.C., Veiga, M.R., “Caracterização da higroscopicidade de argamassas com base de cal”, Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Junho de 2007.
- [21] Ramos, N.M.M, “Modelação da variação da humidade relativa no interior de edifícios”, Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Novembro de 2000.
- [22] Freitas, V.P., “Transferência de Humidade em Paredes de Edifícios – Análise do fenómeno de interface”, Dissertação de doutoramento apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1992.



- [23] Coahn, L.H., “Sorption hysteresis and the vapour pressure of concave surfaces”, Journal of the American Chemical Society, 60, 1938, 433.
- [24] Padfield, T.; Jensen, L.A.; “Humidity buffer capacity of unfired brick and other building materials, 2009.
- [25] Rode, C.; Peuhkuri, R.; Time, B.; Svennberg, K.; Ojanen T.; “Moisture Buffer Value of Buildings Materials”, Symposium on Heat-Air-Moisture Transport: Measurements on Building Materials, Toronto, 23 de Abril de 2006.
- [26] Abadie, M.C.; Kátia, C.M.; “Moisture performance of building materials: From material characterization to building simulation using the Moisture Buffer Value concept”, Building and Environment, 44, 2009, 388-401.